

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ В.А.Пасічник
(підпис)

“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності

133 – галузеве машинобудування
(код і назва)

на тему: Формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусів із полімерних метеріалів

Виконав: студент 6 курсу, групи МІ-61м

(шифр групи)

Яременко Володимир Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник

д.т.н., проф. Равська Н.С.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів

ім. В.Н. Бакуля НАН України, к.т.н. Бурикін В.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут Механіко-машинобудівний

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 133 – галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А.Пасічник

(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

**на магістерську дисертацію студенту
Яременку Володимирі Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації Формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусів із полімерних матеріалів,

науковий керівник дисертації

д.т.н., проф. Равська Н.С.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Процес виготовлення просторової деталі із полімерного матеріалу

4. Предмет дослідження Формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусу методом вакуумного термоформування листової заготовки

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналіз методів виготовлення деталей із полімерних матеріалів та їх ефект від застосування в умовах малосерійного виробництва. 2. Дослідження умов формоутворення методом термоформування, виявлення проблем процесу та методи їх вирішення. 3. Порівняльний аналіз результатів дослідження та фізичної моделі.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу 10-15 слайдів презентації

7. Орієнтовний перелік публікацій 2 публікації на науково-технічних конференціях

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	1-й розділ «Аналіз методів виготовлення корпусних деталей»	10.07.2017	
2.	2-й розділ «Дослідження формоутворення корпусу методом термоформування та розробка формуючого інструменту»	10.09.2017	
3.	3-й розділ «Перевірка результатів моделювання»	10.01.2018	
4.	4-й розділ «Маркетинговий аналіз»	10.02.2018	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Яременко В.В. Формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусів з полімерних матеріалів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – Київ, 2018.

Проаналізувавши сучасні методи виробництва полімерних корпусних деталей в умовах штучного та малосерійного виробництва, порівнявши їх переваги та недоліки, в якості технології виготовлення корпусу було обрано метод вакуумного термоформування пластику. Даний метод виготовлення дозволив суттєво скоротити витрати на проектування та виготовлення формоутворюючого інструменту.

В дисертації приведено шляхи вирішення проблеми нерівномірного розподілу товщини стінки корпусу, досліджено процес витяжки матеріалу заготовки в процесі термоформування шляхом його моделювання методами кінцевих елементів в середовищі ANSYS PolyFlow. Конструкцію формоутворюючого інструменту розроблено з огляду на формування мінімально допустимої товщини стінки деталі корпусу з умов жорсткості, що відповідають міжнародним стандартам, встановленої шляхом моделювання випробувального навантаження засобами кінцевих елементів.

Проведено експериментальну перевірку результатів моделювання та встановлено, що при оцінці розподілу товщини стінки деталі моделювання процесу може замінити експериментальні методики. Внаслідок чого зменшити зменшити вартість та затрати часу при розробці нового продукту та його корпусу.

Ключові слова. *Термоформування, формуючий інструмент, моделювання, витяжка полімеру при формуванні, метод кінцевих елементів.*

АННОТАЦИЯ

Яременко В.В. Формообразующий инструмент и технология изготовления корпусов из полимерных материалов.

Диссертация на соискание ученой степени магистра по специальности 133 - отраслевое машиностроение. - Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского". - Киев, 2018.

Проанализировал современные методы производства полимерных корпусных деталей в условиях единичного и мелкосерийного производства, сравнил их преимущества и недостатки, в качестве технологии изготовления корпуса был выбран метод вакуумного термоформования пластика. Данный метод изготовления позволил существенно сократить затраты на проектирование и изготовление формообразующего инструмента.

В диссертации приведены пути решения проблемы неравномерного распределения толщины стенки корпуса, исследован процесс вытяжки материала

заготовки в процессе термоформования путем его моделирования методами конечных элементов в среде ANSYS PolyFlow. Конструкция формообразующего инструмента разработана с учетом формирования минимально допустимой толщины стенки детали корпуса из условий жесткости, соответствующих международным стандартам, установленной путем моделирования испытательной нагрузки средствами конечных элементов.

Проведена экспериментальная проверка результатов моделирования и установлено, что при оценке распределения толщины стенки детали моделирование процесса может заменить экспериментальные методики. В результате уменьшить стоимость и затраты времени при разработке нового продукта и его корпуса.

Ключевые слова. *Термоформования, формирующий инструмент, моделирование, вытяжка полимера при формировании, метод конечных элементов.*

ABSTRACT

Yaremenko V.V. Forming tool and technology of manufacturing housing from polymer materials.

MCs thesis for a master's degree in specialty 133 – mechanical engineering. - National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. - Kyiv, 2018.

Analyzing modern methods of production of polymer housing parts under single and small batch production conditions, comparing their advantages and disadvantages, the vacuum thermoforming method of plastic was chosen as the manufacturing technology of the housing. This method of manufacturing has made it possible to significantly reduce the costs of designing and manufacturing a tool.

In the thesis the ways of solving the problem of uneven distribution of the shell wall thickness are given, the process of drawing the workpiece material in the process of thermoforming by its finite element modeling in the ANSYS PolyFlow environment is investigated. The construction of the forming tool is designed taking into account the forming the minimum permissible wall thickness of the housing part from the rigidity conditions that meet international standards established by modeling the test load by means of finite elements.

The experimental verification of simulation results is carried out and it is established that in the estimation of the wall thickness distribution of a part, the simulation of the process can replace the experimental methods. As a result, reduce the cost and time costs when developing a new product and its enclosure.

Keywords. *Thermoforming, tool forming, modeling, polymer stretching during formation, finite element method.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА КОНСТРУКЦІЇ ФОРМОУТВОРЮЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ.....	8
1.1. Конструкторсько-технологічні особливості корпусних деталей.....	8
1.2. Аналіз процесів виготовлення полімерних корпусів.....	11
1.3. Особливості процесу термоформування полімерів.....	20
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ КОРПУСУ МЕТОДОМ ТЕРМОФОРМУВАННЯ ТА ФОРМОУТВОРЮЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ.....	26
2.1. Попередня розробка конструкції корпусу.....	27
2.2. Визначення мінімально-допустимої товщини стінки.....	29
2.3. Дослідження розподілу товщини стінки в процесі витяжки.....	35
2.4. Формоутворюючий інструмент.....	44
3. ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ.....	48
3.1. Виготовлення дослідного зразка.....	48
3.2. Методика проведення дослідження.....	51
3.3. Перевірка результатів моделювання.....	54
4. МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМОФОРМУВАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	60
4.1. Опис ідеї проекту.....	60
4.2. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	63
4.3. Технологічний аудит ідеї проекту.....	65
4.4. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту.....	66
4.5. Розробка ринкової стратегії проекту.....	71
4.6. Розроблення маркетингової стратегії проекту.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
Додаток А. Технічне завдання.....	77
Додаток Б. Інформаційне креслення формоутворюючого інструменту.....	78
Додаток В. Формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусів з полімерних матеріалів.....	79
Додаток Г.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день вироби з пластмас все активніше витісняють альтернативні матеріали для виготовлення ємностей, корпусів та комплектуючих для виробництв будь-якого напрямку. Це, в першу чергу, пов'язано з універсальністю полімерних матеріалів. На відміну від металів пластик стійкий до 95% речовин наявних в природі та оточуючому середовищі. Відсутність корозійних та окислових процесів дозволяє експлуатувати пластикові вироби на протязі довгого періоду часу не втрачаючи при цьому властивостей матеріалу. Так, споживання пластмас в цій галузі стає таким же (в одиницях об'єму) як споживання сталі. Безперервно зростає також застосування лакофарбових матеріалів, синтетичних волокон, клеїв, гуми та інше.

Будь-який процес виробництва буде більш успішним, якщо отримані з його допомогою вироби будуть більш рентабельні, ніж отримані за іншою технологією. Загалом, в сфері переробки пластмас утворення деталі формуючим інструментом відноситься до шляхів переробки із високими темпами зростання. Причому це справджується як для виробництва технічних виробів, так і полімерної упаковки.

З іншої сторони, не дивлячись на очевидні переваги матеріалу, поряд із щорічним зростанням полімерної продукції в одних сферах (зростання об'ємів випуску понад 10% в рік) спостерігається низька активність в застосуванні полімерів, наприклад, виробниками електроніки та електротехніки (загальна доля полімерів в електротехніці складає 8-10%). Це пояснюється низькими об'ємами випуску продукції: штучне та малосерійне виробництво, де більшість полімерних технологій є економічно недоцільними. Слід зазначити, що в даному сегменті вже відбуваються впровадження полімерних матеріалів і, поступово, наростає перехід до широкого їх застосування. Опосередковано на актуальність даного питання вказує ринок аддитивних технологій, швидкого прототипування, що активно розвивається в останній час.

Таким чином можна сказати, що в певних категоріях виробництва існує стабільний інтерес у впровадженні полімерних матеріалів та технологій їх формування на заміну, наприклад, металів і сплавів. Проте недостатній розвиток та непристосованість традиційних технологій до реальних, особливих умов гальмують цей процес. Тому необхідно впроваджувати економічно ефективні та надійні альтернативи формування полімерних виробів, тим самим розширити сферу їх застосування, удосконалювати існуючі виробничі процеси для усунення втрат часу й ресурсів при малосерійному випуску продукції.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є досягнення зниження витрат при проектуванні та виробництві корпусів з полімерних матеріалів за рахунок розробки ефективного формоутворюючого інструменту та технології їх виготовлення.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі передбачається визначення таких задач:

1. Аналіз методів виготовлення деталей з полімерних матеріалів та їх ефект від застосування в даній галузі.
2. Вибір та обґрунтування технології виготовлення деталі корпусу, особливості процесів формоутворення.
3. Визначення задач і проблем при обраному процесі формоутворення. Дослідження та шляхи їх вирішення.
4. Аналіз особливостей та вимог до формоутворюючого інструменту при обраній технології виготовлення.
5. Розроблення технологічного процесу для корпусної деталі та виготовлення тестового зразка несучої конструкції корпусу.
6. Порівняльний аналіз результатів досліджень та фізичної моделі.
7. Пошук шляхів майбутнього удосконалення виробничих процесів та сфер застосування.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення просторової деталі з полімерного матеріалу.

Предмет дослідження – формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусу методом вакуумного термоформування листової заготовки.

Практичне значення проведених досліджень. В роботі вирішено ряд задач з моделювання процесу витяжки термоформованого матеріалу, що дає інформацію про розподілення товщини стінки на поверхні виробу та дає можливість оцінити поверхню деталі, що не контактує з формоутворюючим інструментом. Отримані дані доцільно використовувати при проектуванні інструменту та вибору товщини листа заготовки. Завдяки вирішеним проблемам за допомогою моделювання процесу методом кінцевих елементів можливо забезпечити не лише відповідність виробу стандартам та заданим параметрам, а і його споживчу якість в плані ергономіки при взаємному проектуванні деталей.

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ ФОРМОУТВОРЮЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

В даному розділі проводиться аналіз досвіду міжнародних компаній та досліджень, що стосуються методів виготовлення корпусних деталей, полімерної продукції в цілому та найбільш поширених полімерних матеріалів. Зокрема розглядаються опубліковані показники компанії Ray Products, Xometry, Ineos Styrenics, Geiss AG та ін. [1, 9]. В них розкриваються витрати на виробництво, що враховують вартість інструменту та процесу виготовлення, особливості процесу та проблеми, які виникають при формоутворенні.

Для аналізу галузей та сфер застосування розглядаються статті видання Thermoforming Quarterly [2], де публікується досвід комерційних компаній, останні дослідження в області виробництва полімерних деталей. Так можна виокремити окремі, найбільш поширені процеси: лиття в прес форми під тиском, лиття полімеру в силіконові форми, 3D друк та аддитивні технології. До прогресивних технологій відноситься процес термоформування просторової деталі з листової заготовки під зниженим (або підвищеним) тиском. Деякі компанії вже мають досвід переходу до останньої технології. Проте продукція відноситься до типу лицьових панелей, кришок та ін.. В даній роботі пропонується впровадити процес термоформування для виготовлення власне деталі типу «корпус» за всіма функціональними ознаками.

Дрібносерійне виготовлення пластикових корпусів має на меті створення деталей в малих кількостях (10 - 1000 шт.). Воно дозволяє запустити партію товару з мінімальними ризиками і витратами.

Продукція підходить для використання в якості дослідної партії, прототипу або кінцевого товару дрібносерійного виробництва. Існує потреба виробляти корпуси з твердого і термопластика, які відрізняються привабливим зовнішнім виглядом, функціональністю, ергономічністю, надійністю. При цьому, бажано досягти позитивного техніко-економічного результату.

1.1. Конструкторсько-технологічні особливості корпусних деталей

До корпусів відносять деталі, що несуть в собі систему отворів і поверхонь, координованих один відносно одного. Корпусні деталі необхідні для монтажу і утримання різних механізмів, пристроїв та апаратів [16].

Всі електричні пристрої несуть в собі корпусні деталі в виді власне корпусу, каркасу, рами, панелей на яких кріпляться деталі пристрою. Прослідковується два основних напрями існування корпусу: корпус як частина механізму пристрою (магнітопровід, пневматичний циліндр, резервуар і т.д.) та корпус як окрема несуча деталь чи оболонка (короб, ящик, кожух, шафа і т.д.). В контексті даної роботи розглядається останній варіант, так як за завданням в компоновці приладу не має несучих частин, які можна було б використати в якості корпусу. Крім того, таке позиціонування задачі відкриває більш широкі можливості для подальшого застосування, так як розробка корпусу не обмежується частиною механізму чи

пристрою, а є самостійною окремою задачею, що залежить від бажаної компоновки та зовнішнього вигляду.

Призматичні і фланцеві корпуси можуть бути роз'мною і нероз'ємного типу [16]. За спільністю рішення технологічної задачі може бути віднесений до однієї з двох груп:

- 1) Призматичні (коробчатого типу) з плоскими опорними поверхнями і отворами, осі яких розташовано паралельно чи під кутом;
- 2) Фланцевого типу з поверхнями, що є торцевими поверхнями основних отворів.

Основною конструктивно-технологічною особливістю корпусних деталей є їх відповідальне призначення як конструкційних. В зв'язку з цим деякі їх поверхні необхідно обробляти з високою мірою точності та якістю поверхні. Такі площини і отвори слугують базами при спряженні деталей пристрою між собою і корпусними деталями.

Вказані особливості визначають наступні конструктивно-технологічні вимоги:

- 1) Висока якість матеріалів, міцність та жорсткість конструкції для забезпечення механічної міцності та зносостійкості пристрою, а також для точного виготовлення, зменшення або ліквідування деформацій деталей в процесі обробки;
- 2) Точність обробки площин і отворів з відповідною шорсткістю (особливо базових)

Методи виготовлення корпусних деталей. Різноманітні вимоги, що пред'являються до електричних пристроїв, в залежності від умов та області експлуатації породжують різноманітні конструктивні форми деталей, оболонок, резервуарів і т.д..

Це в свою чергу призводить до різноманітних технологічних процесів виробництва таких деталей. В табл. 1.1 наведено перелік основних видів корпусних деталей, а також вказані найбільш поширені та прогресивні процеси виготовлення [16].

Таблиця 1.1 - Технології виготовлення корпусів

Основний вид деталей та збиральних одиниць	Матеріал	Основні технологічні процеси отримання заготовок і подальшої обробки деталей							
		Механічна обробка	Лиття	Холодна штамповка	Зварювання	3D друк	Термоформування	Лиття під тиском	Пресування
Корпуси, ящики, кришки, ковпаки, кожухи:									Збирання з напівфабрикату та профілів
- литі	Метал		+						
- холодноштамповані	Метал			+					
- пресовані	Полімери								+
- зварні	Метал				+				
- збірні	Метал/Пластмаси								+
- металокерамічні	Металокераміка								+
- композитні	Композити								+
- фрезеровані	Метал/Пластмаси	+							
- друковані	Пластмаси					+			
- литі полімерні	Полімери		+					+	
- формовані	Пластмаси						+		

Як бачимо, технологія виготовлення поширюється на певні види матеріалів і в деяких випадках вибір матеріалу автоматично визначає технологію виготовлення. Згідно завдання далі будуть розглядатися технології, які дозволяють працювати з полімерними матеріалами. Технологія та процеси для інших матеріалів можуть бути використані для запозичення певних методик, технологічних елементів та порівняння.

З іншої сторони, обмеження доступних технологій відбувається за рахунок планованого об'єму випуску продукції. Саме тому клас технологій за методами лиття: в форми та під тиском, а також метод пресування пластмас розглядається як єдине ціле, тому що, по-перше мають ряд спільних ознак за потребами у обладнанні та оснастці; по-друге в деякій мірі одна технологія є варіантом розвитку чи модифікації іншої.

В контексті задачі, що планується вирішити розглядаються роз'ємні призматичні корпуси. Якщо розглянути попередні версії приладів компанії-виробника (Рис. 1.1), то можна прослідкувати описану вище спільність деталей,

ВЕРХНЯ ЧАСТИНА КОРПУСУ

ФРЕЗЕРОВАНА ЧАСТИНА КОРПУСУ (МЕТАЛЕВА ЧАСТИНА)

а)

ЗВАРНА КОНСТРУКЦІЯ (НЕСУЧА ЧАСТИНА КОРПУСУ)

ОБОЛОНКА З ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ

б)

г)

176,5±1

44,5

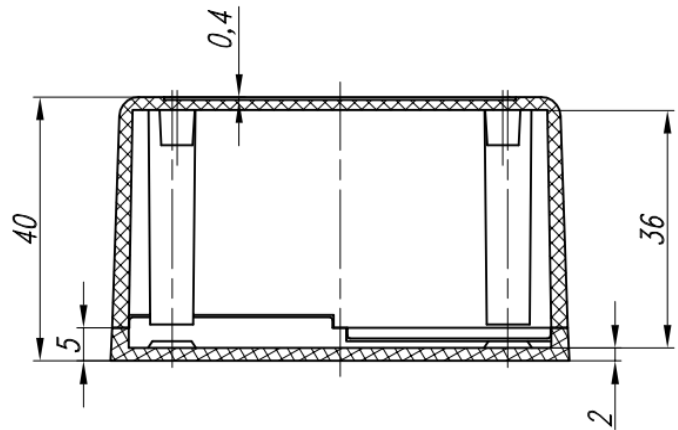
Рисунок 1.1 – Попередні версії приладів та їх корпусів
а – корпус з акрилової (відлитої) та алюмінієвих (фрезерованої)
частин, б – зовнішній вигляд фрезеровано-литого корпусу, в – корпус
збірної конструкції (зварний (метал) з полімерною оболонкою (ПВХ)), г –
профіль зварної частини

1.2. Аналіз процесів виготовлення полімерних корпусів

11



а)



б)

Рисунок 1.2. – Типовий універсальний корпус
а – зовнішній вигляд, б – типова конструкція

В даному випадку універсальний корпус після подальшого оброблення та оформлення вирізів, отворів і т.п. буде повністю відповідати шуканому за функціональністю. З однієї сторони, для виробника електроніки такий корпус є раціональним рішенням, проте є ряд недоліків, які не дозволяють розглядати цей варіант при вирішенні поставлених задач:

- 1) Зниження можливостей конкурентної боротьби за рахунок типового та універсального зовнішнього вигляду, відсутність впізнаваності бренду на ринку, висока можливість виникнення підробок продукту;
- 2) Низький спектр вибору матеріалів, неможливість їх комбінації;
- 3) Універсальний корпус у вихідному стані потребує подальшої обробки для досягнення функціональності;
- 4) Немоżliвість використання підходів дизайну, власного стилю компанії;

Тому прийнято рішення шукати шляхи вирішення питання за допомогою виготовлення корпусу власної конструкції, при цьому забезпечити відповідність конструкції обраній технології, що дозволить знизити витрати за умов малосерійного виробництва.

Між тим, коли величина серії виробу наближається до 1000 шт. в рік, варто звернути увагу на створення конкретних прес-форм для нового корпусу. Переваги корпусу власної конструкції очевидні, а його основні недоліки – вартість оснастки і час її виготовлення нівелюються з огляду на об'єми продукції. Повний цикл створення корпусу від початку розробки до серійного виробу складає від двох до шести місяців, а його вартість для більшості приладів знаходиться в діапазоні від 5 до 25 тис. дол. США і більше залежно від габаритних розмірів виробу. При цьому подальша вартість виготовлення складає 0,1 – 0,2 дол. США за корпус. Тому необхідно чітко дослідити наявні технології з огляду на об'єм випуску, що планується (100-1000 шт.) [2].

Характеристика типів виробництва корпусів. В даному випадку серед компаній виробників постала проблема: ряд партнерів, постачальників та користувачів електротехнічної продукції зацікавлені у виготовленні одиничних або малих серій виробів, а саме корпусів власної конструкції та зовнішнього вигляду. Це обумовлено специфікою галузі (наприклад, професійна високоякісна аудіо- та електротехніка) та умовами ринку. Замовники даного виду приладів зацікавлені у конкретному наповненні приладу з точки зору його компоновки та функцій, а також вимог до дизайну та сертифікаційних умов. Тобто інтерес становить можливість випуску продукції в об'ємі 100-1000 шт. і подальшого закриття або призупинення проекту.

Тобто області виробництва, що становлять інтерес, можна охарактеризувати наступним чином:

- Виробництво продукції, обсяг випуску якої за весь життєвий цикл не перевищує однієї тисячі штук. Зазвичай це об'єкти спеціального приладобудування, тривалість випуску яких визначається конкурентною боротьбою, а обсяги випуску - заздалегідь відомим числом споживачів.
- Виробництво випереджальних партій продукції паралельно з процесом підготовки масового виробництва і основного інструментального оснащення. Це характерно для комплексних виробів загального приладобудування, де тривалість виходу нового виробу на ринок значна, а фактор лідерства на ринку по виходу оновленої продукції має критичне значення.
- Виробництво малих серій і дослідних партій високотехнологічних і / або наукоємких об'єктів з метою проведення маркетингових досліджень або попереднього тестування. Зазвичай це об'єкти масового виробництва, де конкуренція на рівні функціональних властивостей досягла своєї межі. У даній ситуації на перше місце в боротьбі за переваги споживача виходять ергономіка і дизайн, зовнішній вигляд і упаковка. За допомогою попереднього тестування знижується комерційний ризик, причому на перше місце виходять тимчасові втрати в порівнянні з матеріальними. Обсяг цих партій коливається в основному від 10 до 2000 шт. –
- Виробництво дослідних партій продукції для попередніх, оціночних та інших видів випробувань. Метою є отримання деталей, що визначають споживчі якості всього виробу, що впливають на безпеку експлуатації, або визначають вплив інших факторів, регламентованих законодавством. Для вирішення даного завдання використання матеріалів-замінників неприпустимо. Крім матеріалів, для виробництва виробів даної групи використовують ті ж самі технологічні процеси, що і в основному виробництві.

Прийнято класифікувати ці завдання за способом отримання формотворчих частин оснащення і технологій отримання самих деталей в цьому оснащенні (мова йде про технології, що виключають традиційне ЧПУ - фрезерування і електроерозійну обробку) [8].

Серед наявних можливостей необхідно провести порівняльний аналіз, дослідити конструктивні особливості, розробити ряд вимог до процесів, що

проектуються та оснастки, яку планується використовувати. Необхідно виявити можливі проблеми та запропонувати методи їх вирішення в контексті нової обраної технології.

Аналіз витрат в залежності від об'єму випуску. Почати аналіз слід із найбільш типового та поширеного методу отримання полімерної продукції – лиття термопластичних полімерів.

Аналізуючи досвід Ray Products Company Inc. [1] (Рис. 1.3) вартості оснастки та виготовлених деталей розміром 1200x1500 мм методом лиття полімеру під тиском у прес форми можна зробити висновок про співвідношення економічних складових продукту. Аналізується об'єм випуску 500 – 4500 шт., так як даний сегмент становить найбільший інтерес з точки зору проблем, що розглядаються.

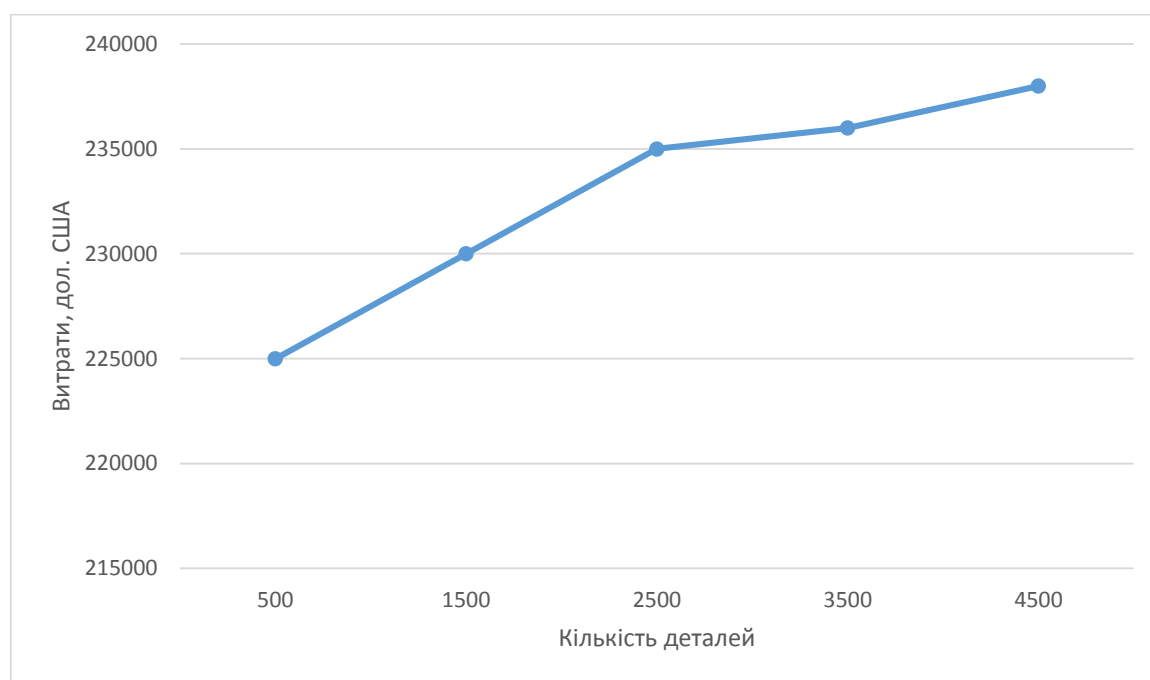


Рисунок 1.3. - Матеріальні витрати при литті полімеру під тиском

Таким чином, вартість деталі з партії 500 шт. становить 452 дол. США, з яких вартість оснастки складає 450 дол. США або 99,5%. В партії 4500 шт. деталей вартість виробу складає 52,9 дол. США, оснастки – 50 дол. США або 94,5%. Враховуючи кількість циклів роботи прес форми можна зробити висновок, що собівартість оснастки при об'ємі в 100 000 шт. деталей і більше буде невпинно знижуватись. Що робить доцільним використання лиття під тиском тільки при великих об'ємах продукції. В сегменті 500-1000 шт. спостерігається висока вартість оснастки, що суттєво впливає на формування кінцевої ціни виробу. З іншої сторони при таких умовах прес форма за період роботи не використовує весь свій ресурс, тому є не ефективним інструментом.

В зв'язку з цим в останній час значно розвивається ринок аддитивних технологій. Це вказує також і на актуальність задач висвітлених у даній роботі.

Стрімкий розвиток технологій швидкого прототипування вирішує ряд проблем наведених вище. Особливо, це стосується виготовлення дослідних партій, прототипів.

Сьогодні технологія 3D-друку набула великої популярності не тільки в світі, але і в Україні. За допомогою 3D-принтера можна порівняно швидко отримати готовий виріб і використовувати його в якості прототипу, для виставки або презентації, в науковій діяльності при моделюванні різних процесів. Роздруковані вироби дозволяють повністю оцінити функціональність майбутнього пластикового корпусу без істотних витрат на запуск багатосерійного виробництва. З цієї точки зору технологія виробництва пластмасових виробів за допомогою 3D-друку є незамінним засобом для оцінки рентабельності продукту. До того ж, на цьому етапі можна легко помітити вади або недоліки функціоналу предмета і переробити 3D-модель.

Найбільш поширеним методом 3D-друку є FDM технологія. Цей метод використовується практично у всіх сферах виробництва. Друк здійснюється пошарово шляхом надходження матеріалу (полімерної нитки) в сопло-дозатор. FDM технологія обмежується розміром принтера, але можливе створення декількох деталей виробу з їх подальшим склеюванням. При використанні цієї технології необхідно створювати спеціальні підпірки, якщо у виробі є великі кути нахилу. Після друку ці підпірки прибираються. Крім того, широко застосовуються технології SLS (лазерне спікання порошку) і SLA (лазерне спікання рідкого фотополімеру). Залежно від використовуваних матеріалів, є можливість отримання корпусу з різних видів пластику будь-якого кольору.

3D-друк відноситься до штучного виробництва пластикових виробів, так як є ідеальним варіантом виробництва корпусів або деталей в маленькому тиражі (до 20 шт.).

Переваги виробництва виробів шляхом 3D-друку:

- Немає підготовчих етапів: відразу після отримання 3D-моделі, її можна відправляти на друк в принтер.
- Дуже простий метод, який не вимагає додаткового обладнання.
- Дозволяє домогтися досить високої точності виробів, яка залежить від застосовуваного принтера.
- Великий вибір матеріалів і методів друку дозволяє реалізувати будь-який проект.

Недоліки технології 3D-друку

- низька продуктивність: друк одного виробу може зайняти кілька годин, коли в інших методах виготовлення пластикових корпусів - від декількох секунд;
- обмеженість за габаритами одержуваних виробів: якщо корпус дуже великий і повинен бути цілісним, то 3D-друк може не підійти для такого запиту в зв'язку з обмеженими розмірами принтера.

Проаналізуємо досвід компанії Xometry [11] (Рис. 1.4), що стосується малосерійності випуску пластикових виробів шляхом 3D-друку для деталі розмірами 100x40x20 мм. В аналізі приводиться вартість одного виробу залежно

від кількості виготовлених деталей. Так як 3D принтер не потребує спеціальної оснастки для кожної деталі – її вартість на графіку не враховується. Для порівняння динаміки зміни вартості додається крива вартості аналогічної деталі, що виготовлена шляхом лиття в прес форму в перерахунку на кількість деталей.

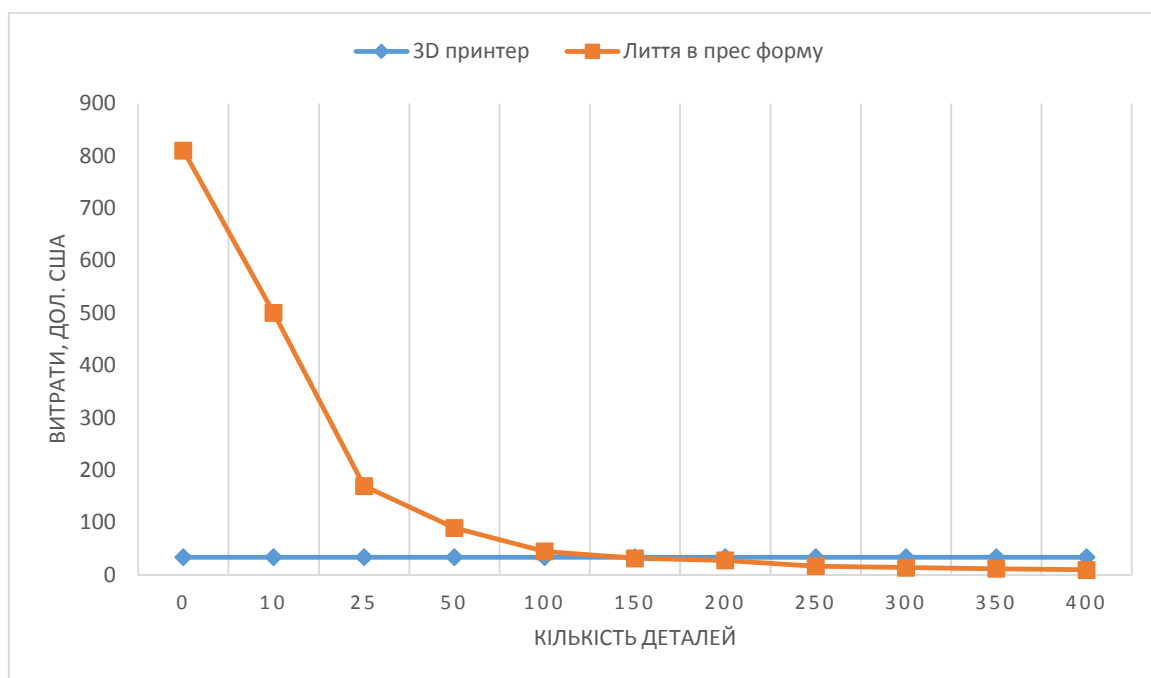


Рисунок 1.4. – Порівняння витрат для процесів лиття та аддитивних технологій

Судячи з наведеного графіка, можна відмітити, що у деталі, яка виготовлена шляхом 3D-друку фактично відсутня зміна вартості залежно від кількості деталей. Проте навіть у порівнянні з литвом у прес форми можна сказати, що вартість деталей при невеликому об'ємі (до 1000 шт.) буде високою. Можна зробити висновок, що на сьогодні 3D друк є ефективним інструментом, якщо обсяг продукції не перевищує 100 шт., але висока вартість устаткування та розхідних матеріалів залишаються високими, що обмежує його використання лише для створення прототипів. Слід також звернути увагу на суттєвий фактор часу створення деталі. Адже деталь створюється пошарово і це значно збільшує час процесу при малосерійному випуску.

Можна зробити такий висновок – в момент коли етап тестування та дослідження продукції завершується і ставиться задача випуску саме продукту в тому чи іншому об'ємі – аддитивні технології не можуть ефективно вирішити ці задачі, так як не несуть суттєвого економічного ефекту в порівнянні з іншими технологіями. Це, безумовно, стимулює подальший розвиток цієї галузі і ці проблеми будуть вирішені в майбутньому. Проте існуючий ряд проблем потребує їх вирішення вже сьогодні.

Інший варіант зниження вартості оснастки при литті полімерів досягається шляхом лиття в силіконові (або полімерні) форми. Цей спосіб відноситься до дрібносерійного виробництва і підходить для виготовлення невеликої партії виробів (від 20 до 1000 штук). Ідея полягає в зниженні вартості оснастки –

основного фактора, що не дозволяє ефективно використовувати лиття при малосерійному виробництві полімерів.

Для виготовлення силіконових форм необхідна майстер-модель - прототип майбутнього виробу. Як майстер-моделі можна використовувати готовий пластиковий корпус або надрукований на 3D-принтері. Можливо істотно підвищити продуктивність за рахунок одночасно використання декількох силіконових форм.

Переваги методу лиття в силіконові форми

- силікон добре повторює форму майстер-моделі, що дозволяє добитися задовільної точності.
- метод відрізняється порівняно невисокою вартістю при невеликих тиражах.

Недоліки використання силіконових форм

- за допомогою однієї силіконової форми можна отримати до 20 готових виробів в залежності від її стійкості;
- обмеженість за габаритами одержуваних виробів: силіконові форми використовують для отримання дрібних і середніх деталей (до 30-40 см);
- невисока швидкість виробництва (застигання пластика може становити кілька годин, що дозволяє отримувати всього 5-10 виробів з однієї форми в день);
- обмеженість конструкції - мінімальна товщина пластикових виробів повинна становити 0,1 мм.

Враховуючи малосерійність випуску, дана технологія здатна забезпечити достатній економічний ефект, проте потребує застосування декількох різних процесів, низький ресурс однієї форми та значний час виготовлення виробу. З огляду на це лиття в силіконові форми не дає змоги ефективно замінити існуючі технології, хоча і має позитивні економічні аспекти.

Серед інших можливих процесів виготовлення корпусу можна виділити термоформування пластику. Аналізуючи експериментальний досвід застосування цієї технології в авіа- та автомобілебудуванні, медичній галузі та пакуванні можна зробити попередній висновок, що дану технологію слід розглянути більш детально.

Ця методика застосовується в основному при малосерійному виробництві об'ємних виробів із пластику, проте в ряді випадків може застосовуватися і при одиничних тиражах.

Обираючи технологію здатну виготовити просторову деталь з листової заготовки слід звернути увагу на декілька важливих аспектів. Перш за все – тонкостінна деталь не має потовщень та відливів для монтажу кріплення, надання жорсткості конструкції. Тому бажану конструкцію корпусу необхідно переглянути та адаптувати для нового процесу. Крім того процес чутливий до температурних режимів, що в високій мірі впливають на якість виробу; має вимоги щодо радіусів спряжень поверхонь та площі формування. Так як площа

зформованої деталі значно відрізняється від площі заготовки (листа) – з'являються локальні потоншення деталі. Проте слід зазначити, що вище наведений ряд проблем можна успішно вирішити, ще на етапі розробки виробу та оснастки, застосовуючи сучасні можливості САПР та моделювання поведінки матеріалу при заданих умовах.

Аналізуючи досвід Ray Products Company Inc з виготовлення виробів за допомогою термоформування розміром 1200x1500 мм, можемо порівняти показники (Рис. 1.5) з наведеними вище.

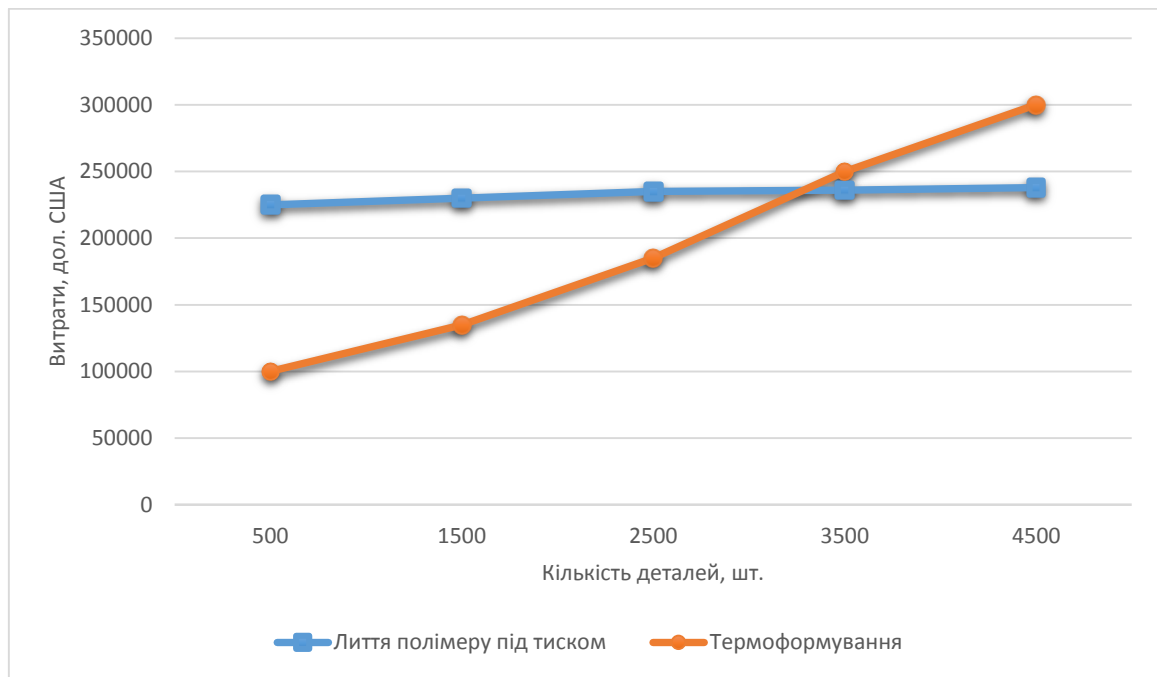


Рисунок 1.5. - Порівняння витрат на виготовлення полімерних деталей

Як бачимо, в проміжку, що становить інтерес, процес термоформування має істотно нижні показники вартості ніж лиття в прес форму, особливо витрати на оснастку – більш ніж у 2 рази. Це дозволяє уникнути зайвих матеріальних витрат при початкових та малих партіях продукту. Також варто відмітити, що даний процес не потребує розплаву полімеру, а тільки його розігріву до стану пластичності, має значно менше вимог, щодо точності і якості оснастки та матеріалів, що застосовується. Переважно це алюмінієві сплави, що легко оброблюються і надійно працюють в діапазоні 500-1000 циклів і більше. Крім того для даного процесу доступні всі види термопластів, наявних в технології лиття під тиском.

Уже на ранньому етапі знайомства з термоформуванням стає зрозуміло, що даний процес відрізняється від вище наведених. З аналізу видно, що у випадку термоформування, процес має суттєві переваги у вигляді рентабельного інструменту, великого різноманіття оброблюваних матеріалів.

Підсумовуючи вище викладене, приведемо до табличного вигляду (Табл. 1.1.) основні параметри та особливості розглянутих процесів. Ці параметри можуть слугувати факторами вибору тієї чи іншої технології в подальшому. Для зручності введемо відносні показники часу та витрат, де за 1 приймемо характеристики для

лиття в прес форми. Це необхідно, тому що в кожному конкретному випадку величина відповідних значень буде відрізнятися, проте завжди спостерігається відносна кореляція параметрів для інших технологій.

Таблиця 1.2 - Зведені характеристики процесів

Характеристики:		Процес:		
		Лиття в прес форми	3D друк	Термоформування
Інструмент	Вид	Прес форма	Не має ф/у інструменту	Матриця
	Матеріал	Інструментальні та конструкційні сталі	--	Алюмінієві сплави/Деревина
Матеріали	Вид	Гранулят	Стрічка/порошок	Лист
	Вид	Термопласти		
Ефективний об'єм випуску, шт.		>1000 шт	<100 шт	<1000
Відносний час виготовлення оснастки		1	--	0,5
Відносний час виготовлення деталі		1	5	2
Відносні витрати на оснастку		1	--	0,4
Переваги процесу		Утворення деталей зі змінною товщиною стінок. Висока точність. Циклічність процесу.	Не потребує оснастки. Широкий вибір конфігурацій деталі.	Низька вартість оснастки. Висока продуктивність.
Недоліки процесу		Високовартісна оснастка та обладнання.	Низька продуктивність. Висока вартість виробів.	Утворення тільки тонкостінних деталей. Потоншення стінок від витяжки.

Отже, для заданих параметрів випуску (<1000 шт.) найкращим чином підходить технологія вакуумного термоформування пластику.

1.3. Особливості процесу термоформування полімерів

Термоформування, технологія гарячого вакуумного формування - це виробництво виробів з термопластичних матеріалів в гарячому вигляді методом впливу вакууму (низького тиску повітря).

Вакуумне формування по суті є варіантом витяжки, при якій листовий пластик, розташований над або під матрицею (інструментом формування), нагрівається до певної температури, і повторює форму матриці за рахунок створення вакууму між пластиком і матрицею (Рис. 1.6).

При термоформуванні вирізняють наступну послідовність процесів;

- нагрівання формованого матеріалу до температури, при якій він здатний змінювати форму, тобто до температури високо-еластичного стану (детальніше в розділі 2);
- формування на спеціальній оснастці для термоформування;
- охолодження в формі до температури, при якій конфігурація зформованого виробу набуває стабільних розмірів;
- видалення деталі з форми

Процес термоформування може потребувати подальших дій над видаленою деталлю:

- обрізка
- зварювання
- з'єднання (склеювання)
- гаряче зпаювання
- друк
- металізація
- флокування

Наведені вище операції найчастіше потребують ручної роботи, тому збільшується трудомісткість всього процесу. Це виникає внаслідок неможливості впровадження на етапі формування більшості конструктивних елементів. В даній роботі розглядаються шляхи скорочення фінішних операцій за рахунок конструктивних змін виробу та інтеграції більшості елементів на етапі формування.

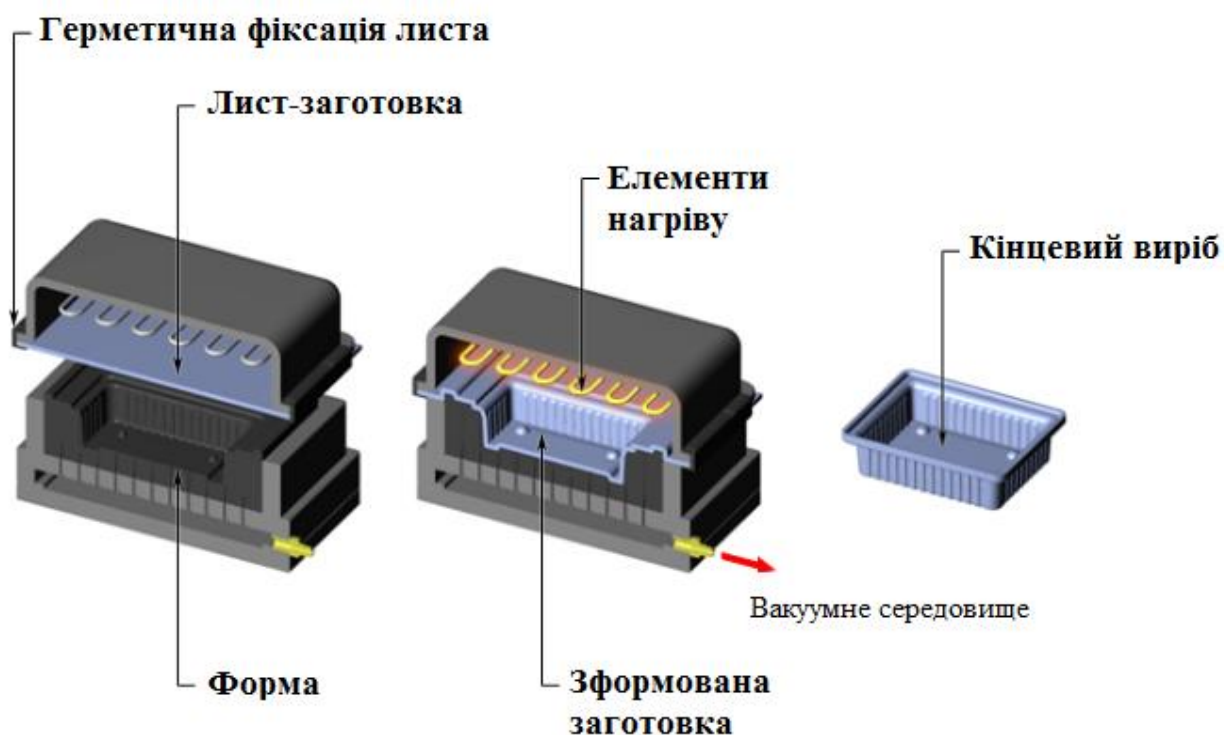


Рисунок 1.6. - Загальна схема вакуумного формоутворення

Полімерні матеріали та напівфабрикати при термоформуванні. За хімічною структурою полімери поділяються на лінійні, розгалужені, сітчасті та просторові. Молекули лінійних полімерів хімічно інертні відносно одна одної і зв'язані між собою лише силами Ван-дер-Ваальса. При нагріванні в'язкість таких полімерів зменшується і тоді вони здатні зворотно переходити спочатку у високоеластичний, а потім й у в'язкотекучий стан. Оскільки єдиним наслідком нагрівання є зміна пластичності, лінійні полімери називають термопластичними [16].

Термопластичні пластмаси (термопласти) — це пластмаси на основі термопластичних полімерів, що під час нагріву розм'якшуються, переходять у в'язкотекучий стан, а при охолодженні тверднуть, і цей процес повторюється при повторному нагріванні. Тобто такі пластмаси допускають повторну переробку. Вони характеризуються невеликою усадкою (1...3%), зручні в переробці, не складні у виробництві тощо. Зазвичай їхня робоча температура не перевищує 90 °С. Ці властивості термопластів роблять можливим їх використання при термоформуванні.

Листи, що використовуються в якості заготовки виробляють із грануляту або порошку, отримуючи напівфабрикат. Це вказує на додаткові витрати на сировину в порівнянні з литтям під тиском. Необхідність закріплення заготовки при термоформуванні і наступний процес обрізки приводять до відходів, які повертаються у виробничий цикл шляхом подрібнення.

Полімери здебільшого аморфні речовини. Довгі ланцюжки та велика молекулярна маса не дозволяють полімерам переходити до рідкого стану (швидше настає хімічний розпад). Проте при підвищенні температури з полімерами відбуваються зміни — вони розм'якають і стають

дуже пластичними. Температура переходу від крихкого стану до пластичного називається температурою склування. Температура склування не є чітко визначеною температурою фазового переходу, а радше вказує на температурний діапазон, у якому відбуваються зміни. При низьких температурах полімери є досить крихкими матеріалами. Параметр температури склування є складовим процесу термоформування. Для успішного протікання процесу необхідно досягти температури склування для конкретного матеріалу при цьому забезпечивши рівномірний прогрів заготовки [14].

Полімерні матеріали мають комплекс характеристик, які при умілому їхньому використанні забезпечують ефективні експлуатаційні властивості виробів та рентабельність їхнього виробництва. До основних переваг полімерів відносять:

- висока технологічність, завдяки якій з виробничого циклу можна вилучити трудомісткі та коштовні операції механічної обробки виробів;
- мінімальна енергомісткість обумовлена тим, що температура переробки цих матеріалів становить, як правило, 150—250 °C, що значно нижче ніж у металів та кераміки;
- можливість отримання за один цикл формування відразу декілька виробів, у тому числі складної конфігурації, а при виробництві погонажних виробів вести процес на великих швидкостях;
- практично всі процеси переробки автоматизовані.

Діапазон товщин матеріалів, що формуються складає від 0,05 до 15 мм, для спінених матеріалів до 60 мм. Будь-які термопласти або матеріали з аналогічними властивостями є термоформуєчі. В табл. 1.2 наведено основні конструкційні термопластичні матеріали, що використовуються при термоформуванні, та їх скорочення, що рекомендовані за ISO.

Аналізуючи доступні матеріали можна сказати, що АБС (ABS) пластик має добре збалансовані характеристики, практично відсутні надмірні показники температури експлуатації та міцності, що безперечно позитивно вплине на вартість напівфабрикату. В наступних розділах буде підтверджено міцнісні характеристики за рахунок статичного аналізу міцності. Окрім того АБС пластик має ряд переваг, а саме:

- висока якість поверхні листа, стійкість до подряпин;
- широкий діапазон кольорів в стані напівфабрикату (це дозволяє скоротити ряд трудомістких фінішних операцій).

Таблиця 1.3 - Основні термоформуючі матеріали

Полімерний матеріал	Позначення за ISO	Густина	Міцність на розтяг	Модуль пружності	Коефіцієнт лінійного розширення	Питома теплоємність	Температура тривалої експлуатації	Температура фазового переходу	Температура плавлення кристалітів	Температура формування
Термопласти		г/см ³	Н/мм ²	Н/мм ²	10 ⁻⁶ /°C	кДж/кг °C				
Удароміцний полістирол	SB, HIPS	1,05	32	3150	70	1,3	-40 +70	80	--	150-200
Сополімер акрилонітрилу, напівбутадієну і стиролу	ABS	1,02	50	2500	90	1,3	-45 +85	100	--	160-220
Сополімер акрилового ефіру, стиролу та акрилонітрилу	ASA	1,07	36	2050	95	1,3	-40 +75	90	--	160-190
Поліпропілен	PP	0,92	30	1200	150	2,0	0 +110	140	--	160-200
Поліметилакрилат	PMMA	1,18	80	3300	70	1,5	-40 +80	100	--	170-200
Полікарбонат	PC	1,20	61	2300	65	1,2	-100 +300	150	--	180-220
Поліетилен	HDPE	0,95	28	1100	200	2,1	-50 +95	105	--	170-200

В табл. 1.4 наведено основні товщини напівфабрикатів, що розглядаються. За необхідності можливо досягнути бажаної товщини пакету за рахунок використання декількох листів/плівок набором.

Таблиця 1.4 - Товщини напівфабрикатів АБС пластику

Товщина, мм	Вага 1 м ² , кг	Колір	Ціна, у.о./м ²
1	1,05	чорний	5,55
2	2,1		11,1
3	3,15		16,65
4	4,2		22,2
5	5,25		27,75
6	6,3		33,3
7	7,35		36,5

Беручи до уваги те, що типова універсальна конструкція наведена раніше має мінімальну товщину стінки 0,4 мм одночасно звертаючи увагу на те, що в процесі витяжки в матеріалі будуть виникати потоншення, попередньо обираємо товщину стінки 2 мм. Ця величина буде уточнена двома кореляціями: розрахунком на допустиму пружну деформацію та аналізом потоншення стінок в процесі витяжки.

Позитивне та негативне формування. При термоформуванні тільки одна сторона нагрітого матеріалу вступає в контакт з формуючим інструментом. Точний відбиток поверхні інструменту передається контактуючій стороні матеріалу. Контури, а також розміри формованого виробу зі сторони, не контактуючої з інструментом, визначаються товщиною стінки. В залежності від того, яка сторона формованого матеріалу перебуває в контакті з інструментом, метод називається позитивним або негативним (Рис. 1.5).

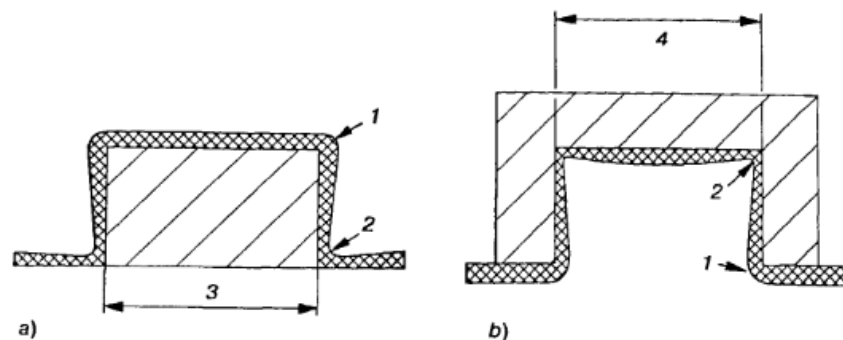


Рисунок 1.5 – Види формування:

- а – схема позитивного формування, б – схема негативного формування;
 1 – товсті ділянки; 2 – тонкі ділянки; 3 – кінцевий внутрішній розмір виробу; 4 – зовнішній розмір виробу

Враховуючи умови завдання - виріб повинен мати глянцеvu зовнішню поверхню. Таким чином необхідно застосувати негативне термоформування для забезпечення контакту зовнішньої частини виробу. За даним методом отримаємо потоншення стінок в місцях переходу поверхонь (особливо в кутах). Найбільше падіння товщини буде спостерігатися на найбільшому віддаленні від робочого поля стола.

В розумних межах будь-які негативні ефекти в кожному випадку можуть бути зменшені за рахунок технічних та технологічних вдосконалень.

Отже, підводячи підсумок, прийнято рішення використати технологію вакуумного термоформування для виготовлення несучої конструкції корпусу як найбільш ефективну та прогресивну за умов малосерійного виробництва. При цьому враховуючи особливості процесу термоформування необхідно дослідити питання зміни величини товщини стінки в процесі витяжки матеріалу, визначити його характеристику та значення. За необхідності внести зміни в початкову конструкцію та відповідний формоутворюючий інструмент. Необхідно визначити початкову товщину листа-заготовки врахувавши процес витяжки, особливості форми та конструкції несучого елемента корпусу.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є досягнення зниження витрат при проектуванні та виробництві корпусів з полімерних матеріалів за рахунок розробки ефективного формоутворюючого інструменту та технології їх виготовлення.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі передбачається визначення таких задач:

1. Аналіз методів виготовлення деталей з полімерних матеріалів та їх ефект від застосування в даній галузі.
2. Вибір та обґрунтування технології виготовлення деталі корпусу, особливості процесів формоутворення.
3. Визначення задач і проблем при обраному процесі формоутворення. Дослідження та шляхи їх вирішення.
4. Аналіз особливостей та вимог до формоутворюючого інструменту при обраній технології виготовлення.
5. Розроблення технологічного процесу для корпусної деталі та виготовлення тестового зразка несучої конструкції корпусу.
6. Порівняльний аналіз результатів досліджень та фізичної моделі.
7. Пошук шляхів майбутнього удосконалення виробничих процесів та сфер застосування.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення просторової деталі з полімерного матеріалу.

Предмет дослідження – формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусу методом вакуумного термоформування листової заготовки.

Практичне значення проведених досліджень. В роботі вирішено ряд задач з моделювання процесу витяжки термоформованого матеріалу, що дає інформацію про розподілення товщини стінки на поверхні виробу та дає можливість оцінити поверхню деталі, що не контактує з формоутворюючим інструментом. Отримані дані доцільно використовувати при проектуванні інструменту та вибору товщини листа заготовки. Завдяки вирішеним проблемам за допомогою моделювання процесу методом кінцевих елементів можливо забезпечити не лише відповідність виробу стандартам та заданим параметрам, а і його споживчу якість в плані ергономіки при взаємному проектуванні деталей.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ КОРПУСІВ МЕТОДОМ ТЕРМОФОРМУВАННЯ ТА ФОРМОУТВОРЮЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

В даному розділі досліджено технологію вакуумного негативного термоформування та формоутворюючий інструмент на прикладі деталі корпусу електропристрою «Mains Block», що являє собою різновид блоку живлення. В межах даного проекту зазнають змін лише корпусні елементи продукту за рахунок використання полімерних матеріалів. Попередні версії приладу з корпусами виготовленими з інших матеріалів були наведені в Розділі 1.

Ряд вимог замовника, щодо форми, розмірів та компоновки приладу зформовано в технічному завданні (Додаток А). Таким чином ставиться задача досягти вимог дизайну та забезпечити візуальну спільність корпусу із уже існуючими приладами.

Для перевірки можливості застосування корпусів, виготовлених методом термоформування, на перевагу корпусам на основі металу, необхідно провести дослідження для перевірки відповідності умовам жорсткості та міцності, що регламентуються стандартами ISO 14123-2-2001, IEC 60335-1-2015, IEC 335-1:91, IEC 335-1:76.

При проектуванні корпусу слід враховувати, що електроприлади кріпляться до робочих площин корпусу. Тому, при сертифікації та випробуваннях продукту, корпус буде піддаватися випробувальним навантаженням. Для забезпечення умов випробувань допускається відступити від вимог технічного завдання на користь забезпечення успішного складання випробувань.

Виконання дослідження необхідно почати з визначення конструкції корпусу. Корпус складається з основної несучої конструкції, яка являє собою суцільний призматичний короб з функціональними елементами.

Основну частину формоутворюючого інструменту становить поверхня контакту деталей-інструмент. Тому робоча частина інструменту утворюється з вихідної конструкції корпусу. Далі інструмент конструктивно оформлюється згідно загальних методик проектування термоформуючого інструменту [12].

Проблема яку планується дослідити полягає у аналізі розподілу товщини матеріалу по поверхні деталі. Проаналізувавши можливі проблеми необхідною задачею є корекція форми виробу і, відповідно, формоутворюючого інструменту для досягнення оптимального розподілу товщини та забезпечення мінімальної товщини з умов жорсткості конструкції.

Дослідження на основі МКЕ аналізу дозволяють значно скоротити не тільки час виконання дослідів, а і матеріальні витрати при проектуванні. Використання методів КЕ аналізу дозволило звести до мінімуму можливі ризики при виготовленні деталі і внесло зміни в конструкцію інструменту ще на етапі розробки виробу та технології його виготовлення.

2.1. Попередня розробка конструкції корпусу

Для проведення досліджень на даному етапі необхідно визначити конструкцію та геометрію корпусу. На Рис. 2.1 наведено вихідні дані для конструкції корпусу.

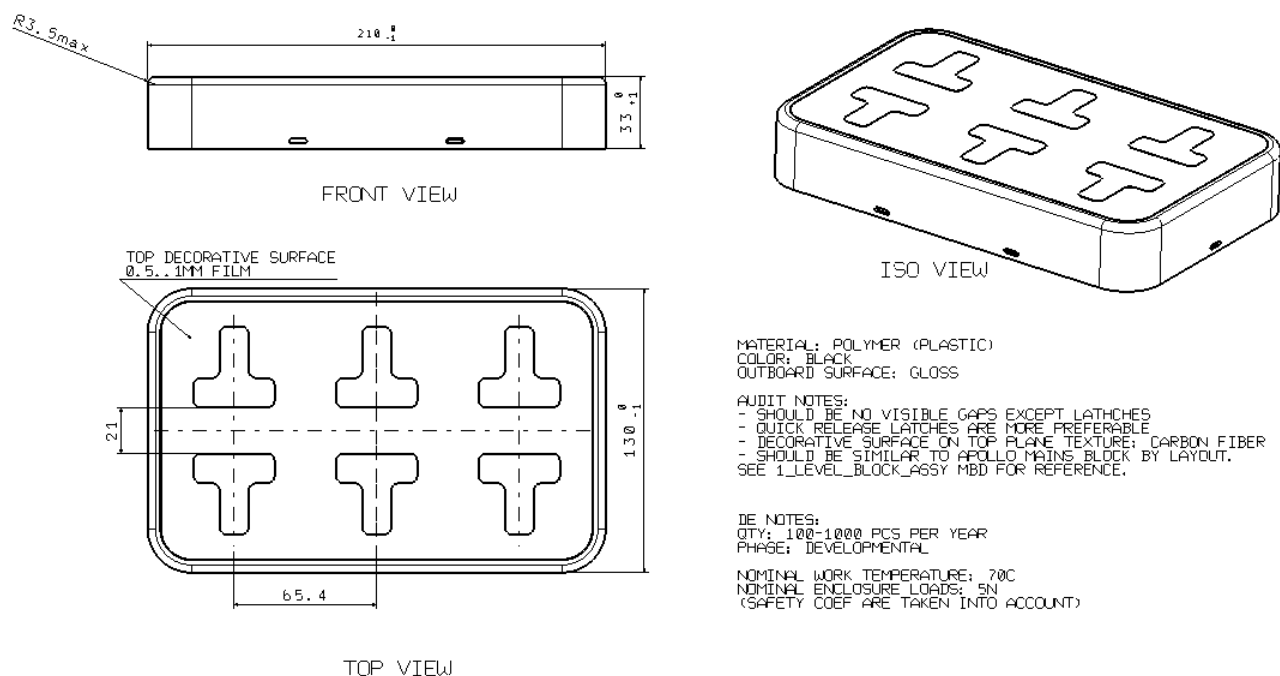


Рисунок 2.1 – Попереднє визначення конструкції корпусу

Отже, згідно завдання майбутній корпус матиме дві робочих площини, одна з яких буде закриватися декоративною поверхнею. Нижня кришка кріпиться за рахунок «швидкокомтованих» замків, що полегшує збирання. Для проектування обрано роз'ємний призматичний корпус з оформленням наведених конструктивних елементів.

При термоформуванні, як і при процесах холодної витяжки, необхідно забезпечити відсутність гострих кромek на формуютьуючому інструменті (Рис. 2.2) та внести в конструкцію позитивні кути уклонів – 0,5°.

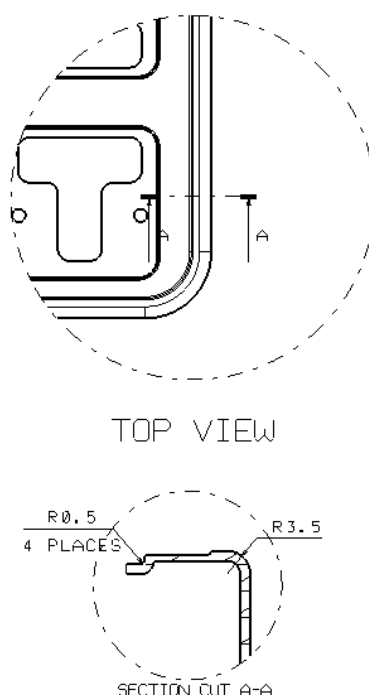


Рисунок 2.2. – Перехід поверхонь корпусу

З точки зору зйому деталі з форми проаналізуємо конструкцію на відповідність [13]. Попередньо були встановлені кути для зйому з форми $0,5^\circ$ та оформлена конструкція без піднутрень. Проте наявність великої кількості переходів може ускладнити зйом деталі з форми. Як видно з Рис. 2.3 деталь відповідає умовам зйому з форми. Далі зовнішню поверхню деталі до вирізання будемо вважати поверхнею формуючого інструменту і використовувати її в подальших дослідженнях.

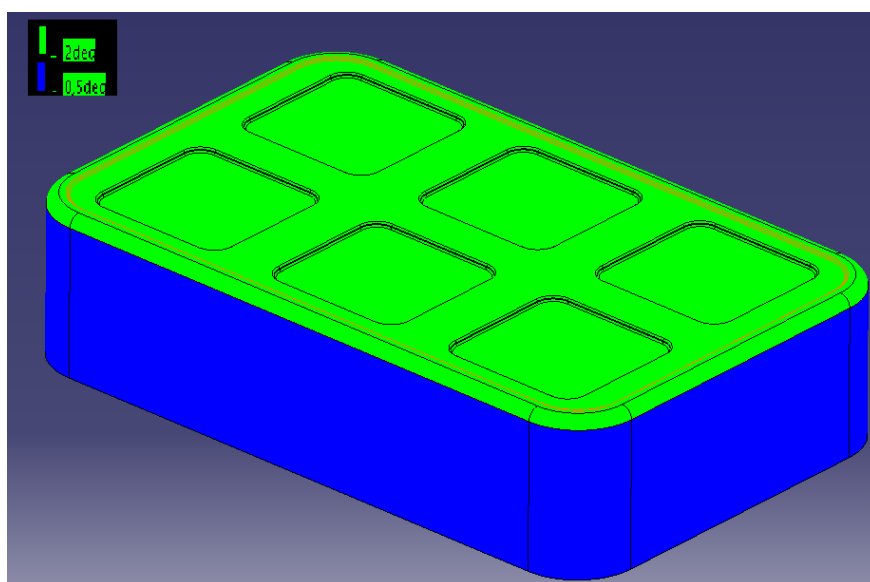


Рисунок 2.3. – Аналіз кутів зйому деталі з форми

2.2. Визначення мінімально-допустимої товщини стінки

2.2.1. Основні положення щодо визначення жорсткості стінки

Передумови для визначення товщини полягають в характерних навантаженнях для такого типу приладів. Загалом при механічному впливі на несучу конструкцію розрізняють механічну міцність та механічну стійкість (жорсткість) конструкції [17].

Корпус приладу, як основна несуча конструкція, в умовах експлуатації є нерухомим та сприймаючим лінійні навантаження від конструктивів, що кріпляться до нього. Такий тип приладів розраховують на жорсткість конструкції – можливість її протистояння дії зовнішніх навантажень з допустимими деформаціями. Коефіцієнт жорсткості

$$\lambda = \frac{P}{f}, \text{ Н/м}, \quad (2.1)$$

де P – зовнішнє навантаження; f – прогин.

Розрахунок прогину в значній мірі залежить від способу закріплення елементів на несучій конструкції. Наукою про опір матеріалів та теорією пружності розрахунок на міцність та жорсткість в достатній мірі освоєний для тіл простої форми – балок, рам, пластин. Як правило, несуча конструкція (корпус) – тіло складної форми. Для визначення жорсткості корпусу доцільно замінити її на модель – поєднання деталей спрощеної форми – балок та пластин. В таких модельних системах від дії зовнішніх навантажень можливе виникнення різних видів деформацій. Однак, в наслідок того, що стінки корпусу являють собою пластини, деформації трансформуються в складний прогин.

Жорсткість корпусу вважається задовільною, якщо дійсне значення прогину f буде меншим ніж допустиме $f_{\text{доп}}$ за стандартами ергономіки. За загальноприйнятою практикою значення $f_{\text{доп}}$ вважається рівним 0,5 мм. За нормальних умов експлуатації навантаження на місце включення вилки становить 0,6..2Н.

З іншої сторони, вмонтовані в корпус прилади будуть піддаватися сертифікаційним випробуванням за ІЕС 60335-1-2015. За міжнародними стандартами контроль здійснюється оглядом та випробуванням вручну. В даному випадку маємо нову конструкцію корпусу, тому при сертифікації прилад буде піддано наступним випробуванням.

Зразок нагрітий до 70°C, його температура підтримується на протязі всього часу випробувань та 5 хвилин після зняття навантаження.

Вилку закріплюють так, щоб не викликати деформації або надмірного стискання корпусу. Елементи корпусу не повинні запобігати виходу вилки з прибору.

На кожен штирь діють силою $(60 \pm 0,6 \text{ Н})$ в напрямку його осі, яку прикладають плавно та без ривків.

Кріплення вважають задовільним, якщо при випробуванні не було прогину в будь-якому місці більше ніж 2,5 мм і на протязі 5 хв всі поверхні залишаються в межах допусків.

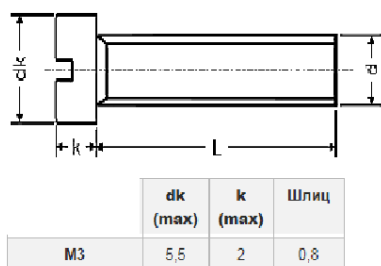
В разі незадовільного експерименту конструкція корпусу переглядається та посилюється її жорсткість.

2.2.2. Дослідження деформацій корпусу

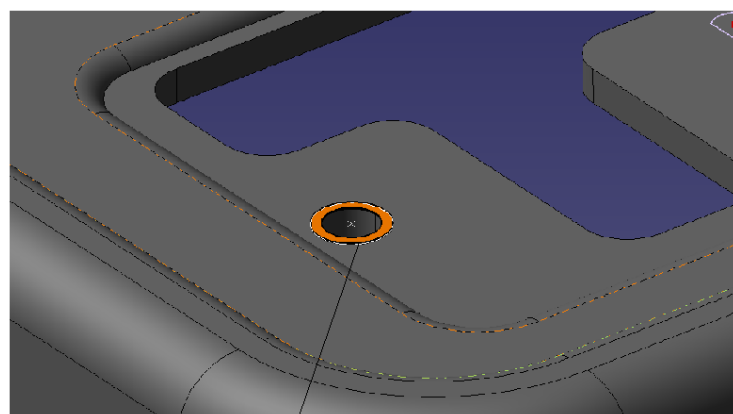
Так як випробування проводиться за статичних умов та враховуючи форму корпусу доцільно провести аналіз методами кінечних елементів (МКЕ). Це в свою чергу дає змогу візуалізувати поведінку корпусу в побутових умовах та зробити висновок не тільки про його жорсткість, а і про ергономічну відповідність також. Адже прогин рівний 2,5 мм при випробуваннях є недопустимим при нормальній експлуатації. Саме тому за нормальних умов прийнято вважати допустимий прогин рівний 0,5 мм. Тому будемо розглядати два випадки симуляції. Перший – для забезпечення сертифікаційним умовам на прогин в 2,5 мм, другий – 0,5 мм за нормальних умов.

Визначення стану матеріалу. Як було наведено в п. 1.3.1. температура фазового переходу АБС пластику складає 100°C, температура розм'якшення 95°C, температура зміни фізико-механічних характеристик 75°C, а температура проведення випробувань - 70°C. Отже, висновок – досліджуваний матеріал є твердим тілом і методи статичного структурного аналізу дозволяють дослідити навантаження деталі корпусу. Вихідні дані матеріалу встановлюємо за табл. 1.3.

Визначення поверхонь прикладання навантажень. Через конструктив-розетку навантаження передаються через кріпильний елемент. В даному випадку кріпильним елементом є гвинт типу ISO 1207. Межі контакту – площа прилягання гвинта до площини корпусу. Застосуємо розподілене навантаження в 60Н до цієї площі навколо кріпильного отвору в корпусі (Рис. 2.4, б). Повторимо цю операцію для кожного кріпильного отвору.



а)



Площа контакту гвинта з площиною корпусу

б)

Рисунок 2.4. – Визначення меж контакту кріплення з корпусом
а – типовий гвинт за ISO 1207; б – місце прикладання навантажень

Засоби проведення дослідження. Користуючись сучасними методами та досягненнями в області конструювання техніки, маючи попередньо спроектовану конструкцію в DS Catia v5 використовуємо модуль Generative Structural Analysis цього програмного забезпечення.

Завдання, які ви будете виконувати в модулі Generative Structural Analysis - це в основному елементи механічного аналізу, в якому деталі або збірки піддаються зовнішнім навантаженням. Після того, як визначені необхідні умови – матеріал аналізу, місця та поверхні прикладення навантаження, їх величина, задано геометричні елементи закріплень та шарнірів, потрібно обчислити і візуалізувати результати.

Особливістю взаємного проектування та аналізу в Catia v5 є можливість широкого використання концепції асоціативності CAD-CAE. Асоціативність означає, що будь-які модифікації деталі, що відбуваються поза межами аналізу МКЕ автоматично відображаються під час виконання завдань у робочому середовищі Generative Structural Analysis. Зокрема, це дає змогу швидко вносити зміни в конструкцію за результатами аналізу. У випадку коли товщина стінки є визначеною попередньо, а величина прогину тільки підлягає дослідженню - передбачаються ітеративні коректування конструкції.

Визначимо ряд параметрів структури МКЕ аналізу при прогині корпусу:

- МКЕ аналіз на основі 3D моделі виробу
 - Задача аналізу: визначення величини прогину при заданій товщині стінки для матеріалу АБС пластику, геометрично визначених опорах, поверхнях прикладання навантажень та їх заданих їх величинах.
- Системні визначення
 - Цифрова модель: для задання цифрової 3D моделі для дослідження використовується модель попередньо визначеної конструкції корпусу (Рис. 2.5, а).
 - Контактуючі поверхні: досліджується власне деталь основної несучої конструкції корпусу, навантаження від інших елементів конструкції прикладені в місцях їх контакту з корпусом (Рис. 2.4, б).
- Зовнішні обмеження
 - Опори: нижня кромка деталі вважається жорстко закріпленою (Рис. 2.5, б).
 - Навантаження: в місцях кріплень прикладено рівномірно розподілене навантаження силою в 60Н кожне. Схема передачі навантаження наведена на Рис. 2.5 (г).
- Вихідні результати
 - Обчислення: генерування результатів прогину та напружень на основі сітки КЕ (Рис. 2.5, в).
 - Дані аналізу: візуалізовані чотири числові значення за обраними характеристиками.

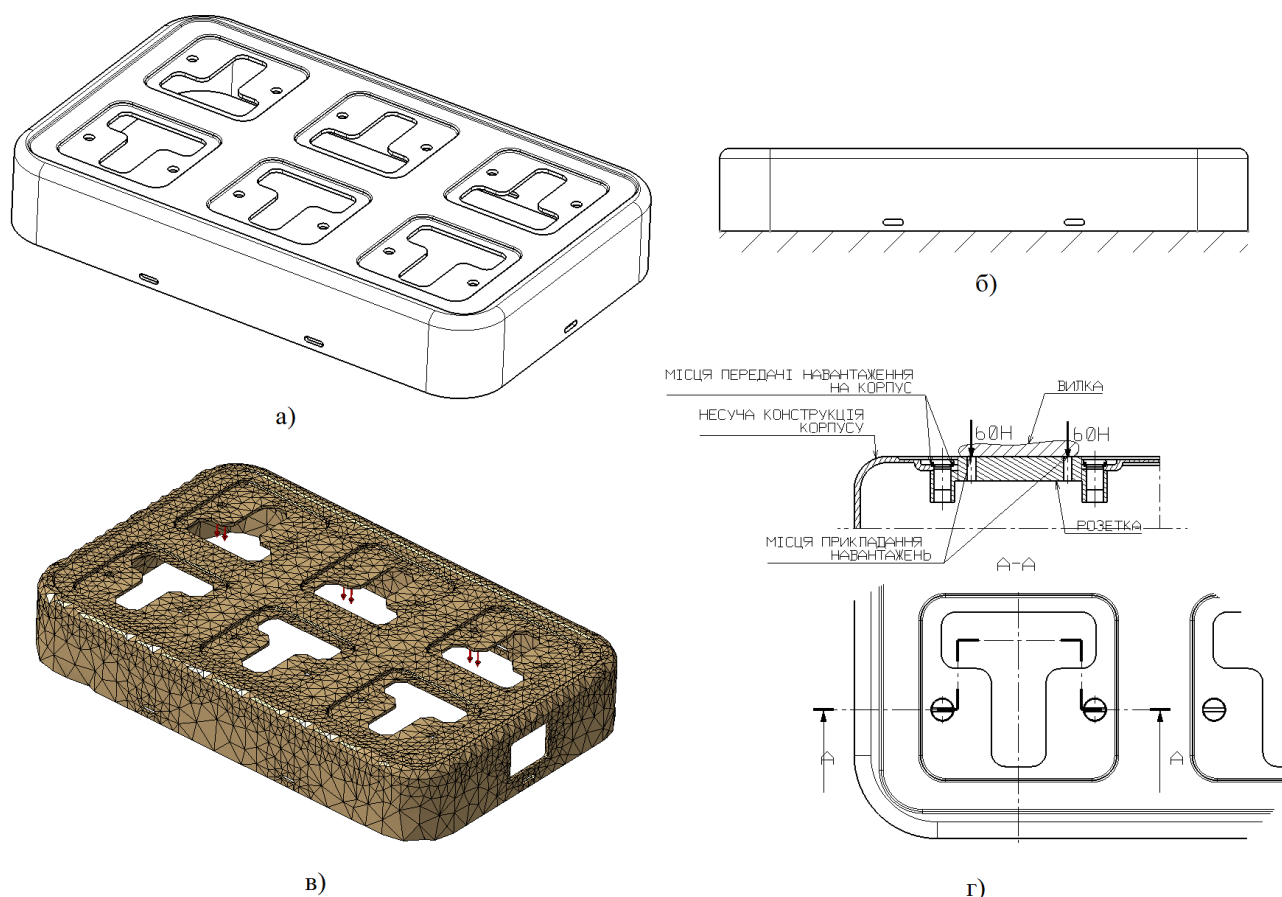


Рисунок 2.5. – До визначення параметрів МКЕ аналізу
 а – цифрова 3D модель корпусу; б – схема опори корпусу;
 в - сітка КЕ; г - схема передачі навантажень на корпус

Прийняті припущення та обмеження. Для отримання досліджуваних величин необхідно прийняти припущення та обмеження [17]. Це деякою мірою вносить похибку в результати розрахунку, проте, враховуючи їх величину, можна вважати їх не суттєвими. Прийняті обмеження істотно спрощують проведення моделювання та обмежують кількість можливих випадків поведінки деталі при навантаженні до їх прийнятного числа. Таким чином, при проведенні дослідження було наступні припущення:

- 1) Зведення задачі до лінійної. Оскільки досліджується лише елемент корпусу – його основна несуча конструкція, як така, що сприймає всі прикладені до пристрою механічні навантаження, то відкидаємо можливі контакти із іншими елементами корпусу. Тобто не враховуються напруження спричинені натягом кріпильних елементів (гвинтів), тертя при деформації різних частин приладу і т.д.. В результаті задача аналізу жорсткості приводиться до лінійної, тобто, переміщення є лінійною функцією від навантаження;
- 2) За прийнятою схемою навантаження зусилля, що прикладається до штирів вилки повністю передається через кріпильний елемент на поверхню корпусу в місці найбільшого розташування отвору. Однак така схема не враховує можливі компенсуючі крутні та згинальні моменти, що виникають в результаті перенесення місця прикладання сили. Однак, слід звернути увагу

на те, що відстань від місця реального прикладання сили (штирі вилки) до місця прикладання сил при дослідженні є порівняно невеликим. Тому в даному випадку прикладанням додаткових моментів сили можна знехтувати з огляду на досить малий їх вплив на процес деформації.

- 3) Так як заздалегідь невідомо величини розподілу товщини стінки при витяжці зроблено допущення – будемо вважати, що лист пластику до формування та після має рівний об'єм, тому потоншення відбувається рівномірно по всій поверхні. На даний момент це спрощує аналіз, так як не має характеристики реального розподілення товщини. Для 3D моделі поєднано приймаємо рівномірну товщину стінки 2 мм.

На основі розробленої задачі аналізу жорсткості МКЕ було виконано фіксацію опори та прикладено навантаження у визначених місцях (Рис. 2.6)

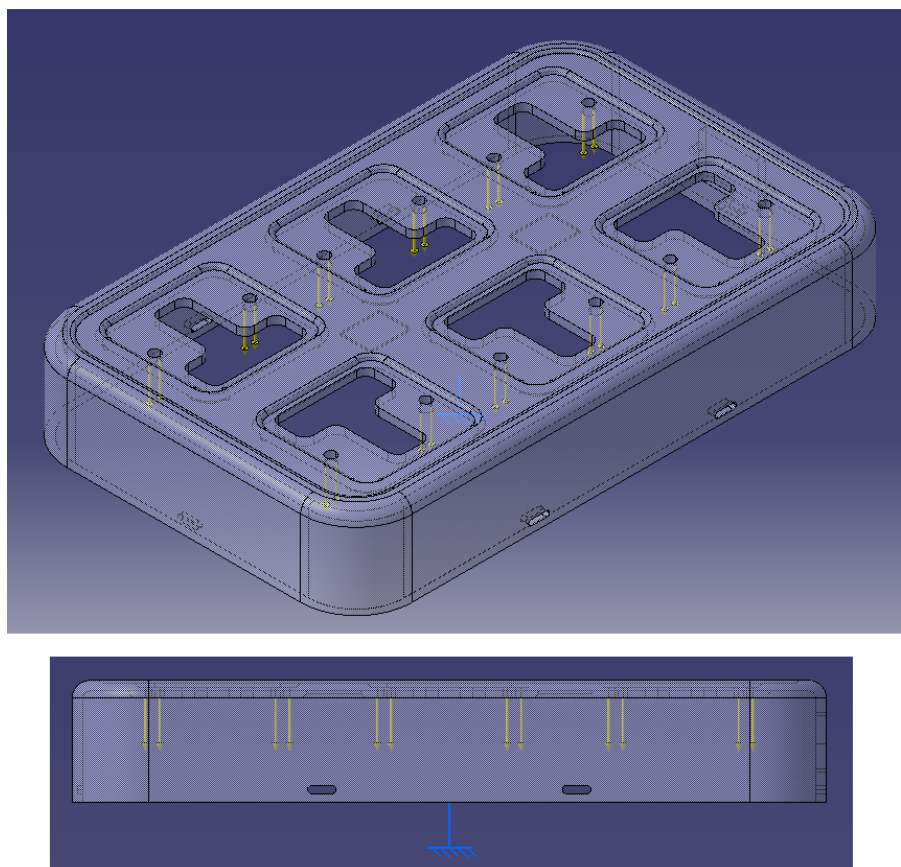


Рисунок 2.6. – Загальна схема навантаження несучої конструкції (Catia v5)

Прогин при навантаженнях за ІЕС 60335-1-2015. Після прикладення навантаження до вказаних місць силою 60Н кожен отримали задовільні результати деформації при товщині стінки 2,75 мм. Приймаємо товщину стінки для деталі 3 мм. На Рис. 2.7 (а) наведено розподілення деформацій після навантаження та напружень (б).

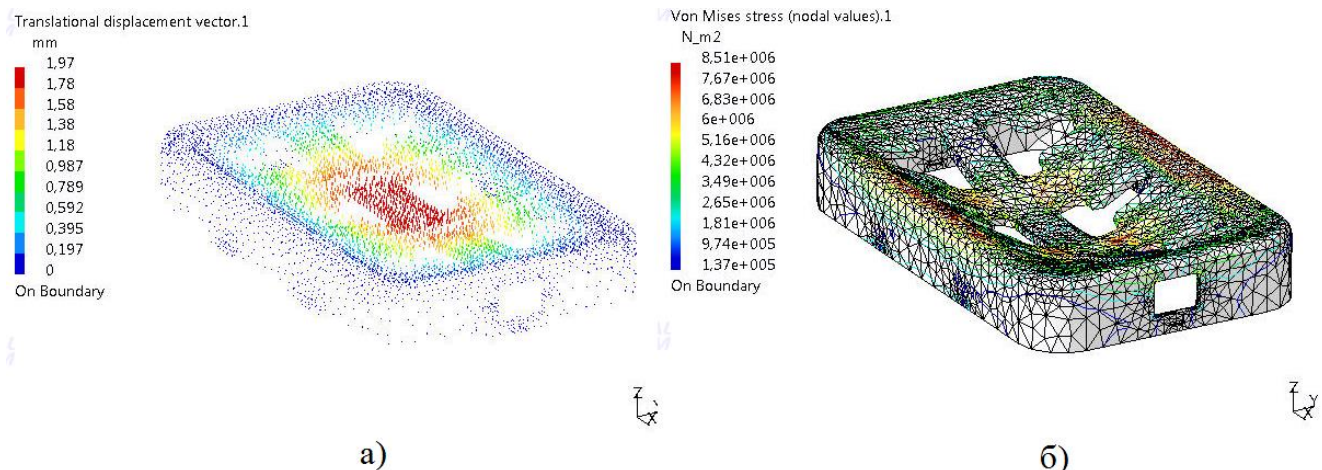


Рисунок 2.7 – Результат навантаження місць кріплення силою 60Н
а – вектори деформацій, б – розподілення напружень на деформованій сітці

Прогин при експлуатаційному навантаженні. Оскільки деформації проходять в межах пружності і схема навантаження не змінюється – скористаємося пропорційністю деформацій та визначимо прогин на основі даних попереднього навантаження. З формули 2.1 прирівняємо коефіцієнти жорсткості конструкції

$$\lambda_1 = \frac{12P_1}{f_1}, \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

$$\lambda_2 = \frac{12P_2}{f_2}, \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

де $P_1 = 60\text{Н}$ – навантаження в першому випадку,

$f_1 = 1,97\text{мм}$ – прогин в першому випадку;

$P_2 = 2\text{Н}$ - навантаження в другому випадку;

f_2 – шуканий прогин в другому випадку;

Приймаємо:

$$\lambda_1 = \lambda_2$$

Тоді,

$$f_2 = \frac{f_1 P_2}{P_1} = 1.97 \frac{2}{60} = 0.0658 \text{ (мм)}$$

З точки зору естетичної привабливості за нормальних умов роботи прогин є більш ніж задовільним.

Отже, підводячи підсумок уточнюємо мінімально-допустиму товщину стінки – 2,75 мм. Товщину приведено до стандартного значення в 3 мм.

Перевірка корпусу на міцність. Забезпечивши виконання умов жорсткості було визначено мінімально-допустиму товщину стінки корпусу. За стандартом ІЕС

60335-1-2015 висувається вимога повернення корпусу в нормальне положення після зняття навантажень. При моделюванні процесу це можна перевірити проаналізувавши максимальні напруження, що виникають в матеріалі під дією навантаження. При деформаціях твердого тіла в межах пружності воно не матиме залишкових деформацій після зняття навантаження. Отже, доцільно порівняти виконання умови міцності за теорією Мізеса-Хенкі:

$$\sigma_{vonMises} \leq \sigma_{lim}, \quad (2.2)$$

де $\sigma_{vonMises} = 8,51$ МПа – критерій максимального напруження по Мізесу, отриманий шляхом попереднього моделювання (Рис. 2.7, б);

$\sigma_{lim} = 40$ МПа – границя текучості матеріалу АБС пластику;

За теорією Мізеса-Хенкі матеріал починає пошкоджуватися в місцях, де напруження по Мізесу ($\sigma_{vonMises}$) стає рівним граничному напруженню. В більшості випадків в якості граничного використовується значення границі текучості (σ_{lim}), що виключає залишкові деформації та руйнування матеріалу. Таким чином за умовою (2.2):

$$8,52 \text{ МПа} \ll 40 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу міцності k корпусу складає:

$$k = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{vonMises}} = \frac{40}{8,51} = 4,7$$

Отриманий коефіцієнт запасу k , що рівній 4,7 дозволяє стверджувати, що деформації під навантаженням проходять в зоні пружності, тому після зняття навантаження корпус повернеться у вихідне положення і не буде пошкоджений.

2.3. Дослідження розподілу товщини стінки в процесі витяжки

2.3.1. Основні положення

Якість термоформування залежить від знання та управління станом матеріалу та параметрами процесу, найбільш важливими наслідками яких є якість та рівномірність товщини листа. Екструдований лист може мати нерівномірну структуру, наявність домішок, нерівномірність подрібнення, змінну товщину листа, термічні характеристики, кристалічність і залишкові напруги. Вплив таких варіацій виявляється під час виробництва, в результаті чого часто виникає потреба корегувати параметри процесу, з'являється ризик незадовільної роботи інструменту, виникнення потоншень, розрив матеріалу, зміна кольору, короблення форми і значні відхилення. Частіше за все це означає додаткові витрати.

У цьому дослідженні буде проілюстровано комп'ютерний аналіз процесу витяжки матеріалу та контролю розподілення товщини стінки виробу, що допоможе запобігти появі проблем в процесі виготовлення деталей.

Формування виробів із листових заготовок проводиться в умовах нагріву полімеру вище температури розм'якшення T_p . В цьому випадку модуль пружності термопластів знижується (Рис. 2.8) приблизно на два десяткових порядки, що різко зменшує значення зусиль, необхідних для здійснення процесу формування. Температура формування T_f значно нижче температури розплаву полімеру. Обидві ці особливості і визначають головні техніко-економічні переваги методу [16].

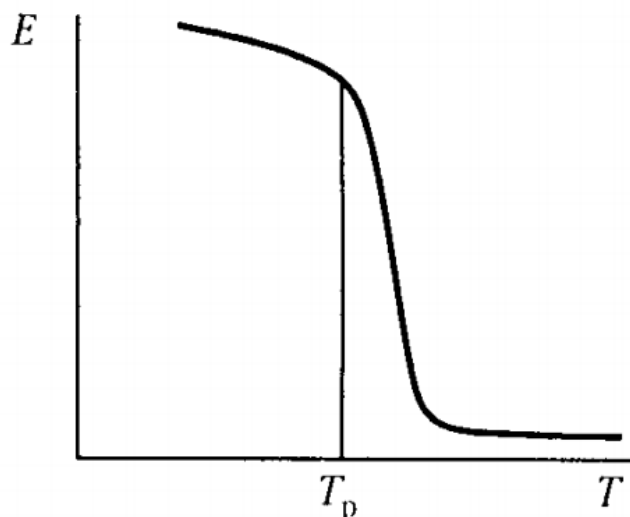


Рисунок 2.8 - Вплив температури (T) на зміну модуля пружності (E) термопластів

Фізико-хімічна особливість високоеластичного деформування полягає в тому, що воно відбувається за рахунок витягування макромолекул, кінці яких зберігають незмінне положення. Досить спрощено це можна проілюструвати за допомогою Рис. 2.7. В положенні «а» полімер не навантажено і макромолекула займає форму квазіклубка, як термодинамічно найбільш вигідну. Після прикладання зусиль формування P_f полімерний зразок витягується на Δl за рахунок витягування сегментів макромолекул в напрямку вектору P_f (Рис. 2.9, б). При цьому положення кінців макромолекул залишається незмінним. Зрозуміло, що чим щільнішою є укладка макроланцюжків у вихідній полімерній заготовці, тим складніше здійснювати конформаційні перебудови макромолекул і, відповідно, її деформацію в розм'якшеному стані.

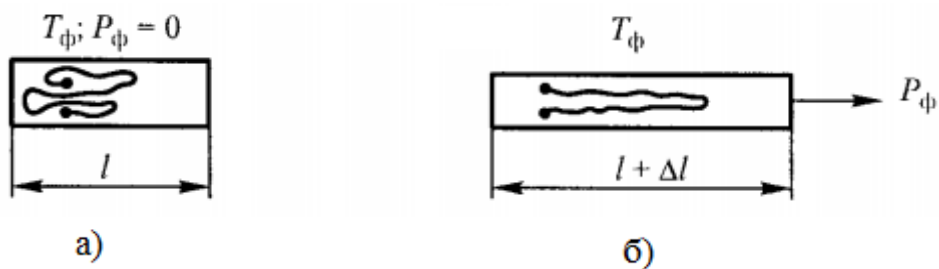


Рисунок 2.9 – Деформація макромолекули при витяжці:

а - ненавантажене умовно-схематичне зображення молекулярного стану полімера; б – навантажене зусиллям P_f

Для кожного термопластичного матеріалу визначений свій температурний діапазон, в якому він в достатній мірі може бути підданий витяжці. В межах цієї оптимальної області температур формування мають прикладатися відносно невеликі зусилля формування [13]. Як було згадано в попередніх розділах процес витяжки супроводжується зміною товщини стінок, при чому найбільше падіння товщини спостерігається в кутах виробу та зонах переходу 3 поверхонь. На рис.2.10 наведено тестовий зразок з попередньо нанесеною сіткою, що характеризує процес витяжки.

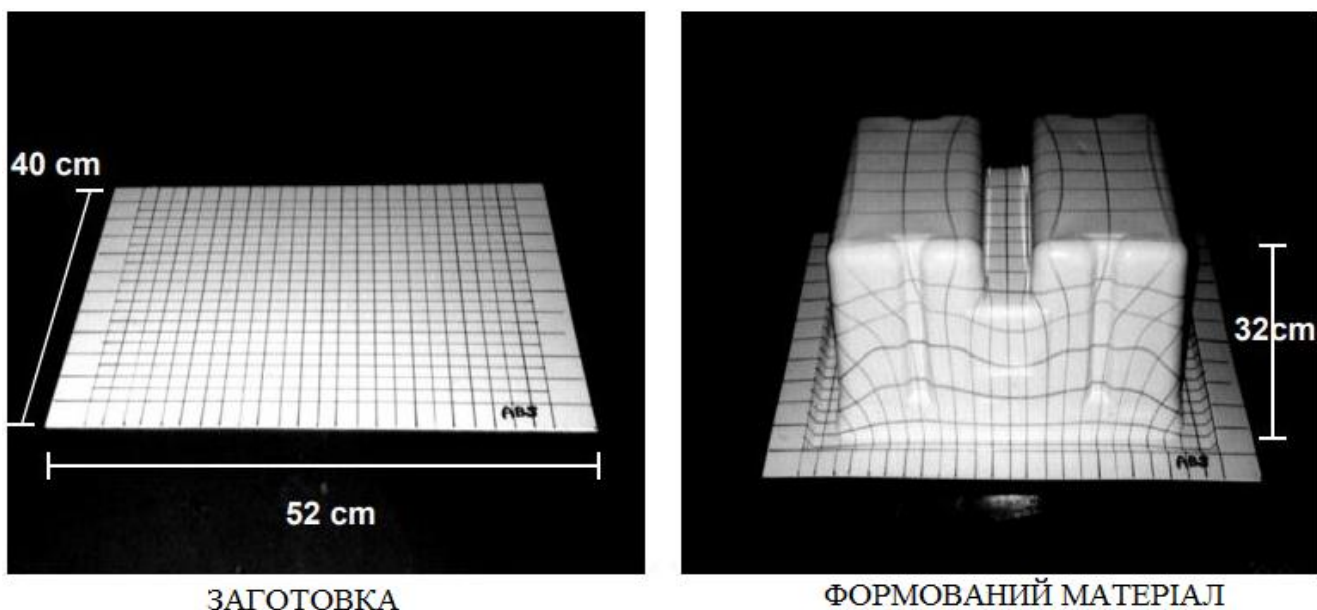


Рисунок 2.10 – Процес витяжки полімерного матеріалу

Нерівномірна зміна сегментів на поверхні відповідає нерівномірній зміні товщини. Таким чином в кутах виробу спостерігається найбільше збільшення сегментів сітки. На Рис. 2.11 показано як при негативному формуванні деталі типу «короб» змінюється товщина стінки. Це відображає загальний характер проблеми.

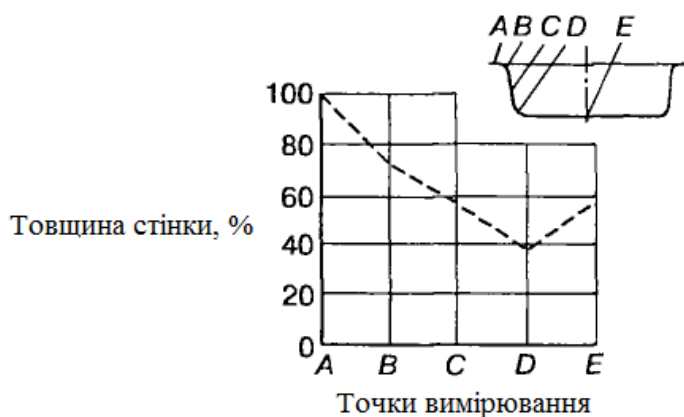


Рисунок 2.11 – Характер зміни товщини стінки деталі

Отже, як бачимо, зміна товщини залежить не тільки від властивостей матеріалу та процесу, а і від конфігурації, геометрії виробу. Це зводить задачу до більш конкретного випадку і потребує детального аналізу.

2.3.2. Методика попереднього визначення зміни товщини стінки

На основі виявленої проблеми виникнення потоншень при витяжці матеріалу, необхідно перевірити відповідність товщини стінки після формування мінімально-допустимому значенню із аналізу жорсткості. Для цього необхідно дослідити процес витяжки при термоформуванні враховуючи геометрію та форму корпусу. Вирішення задачі полягає у правильному виборі початкової товщини листа-заготовки так, щоб після процесу термоформування не виникало потоншень менших, ніж допустимі.

Як згадувалось раніше, дана методика базується на припущенні, що об'єм матеріалу до витяжки та після незмінний. Таким чином розрахунок зводиться до геометричних розмірів, проте не враховує особливості форми того чи іншого виробу [1, 13]. Проте ці характеристики можна використати в якості першого наближення.

Спрощена оцінка товщини стінки термоформованого виробу можлива за умови, що відома початкова товщина заготовки. В якості кінцевої товщини виробу приймемо прийняту раніше мінімально-допустимо товщину з аналізу жорсткості 3 мм. Наведена методика враховує особливості конструкції і нерівномірного розподілу в вигляді допуску в $\pm 30\%$.

Таким чином проведемо наступний розрахунок:

$$V_1 = V_2,$$

Тоді, відповідно,

$$F_1 s_1 = F_2 s_2,$$

З чого випливає:

$$s_1 = \frac{F_2}{F_1} s_2,$$

де V_1 – об'єм матеріалу заготовки; V_2 – об'єм формованого виробу;
 $F_1 = 0,06 \text{ м}^2$ – площа поверхні матеріалу заготовки;
 $F_2 = 0,088 \text{ м}^2$ – площа поверхні формованого виробу;
 $s_2 = 3,9$ – прийнята товщина стінки виробу збільшена на 30% для врахування розкиду.

Далі за розрахунком:

$$s_2 = 3,9 \frac{0,088}{0,06} = 5,72 \text{ (мм)}$$

Попередньо приймаємо стандартизовану товщину листа 6 мм.

2.3.3. Моделювання процесу витяжки термоформованого матеріалу

Оскільки відомо, що в реальному процесі формування відбувається нерівномірна зміна товщини та виникають потоншення, то необхідним є врахування самих елементів форми корпусу. Для цього маючи попередньо визначену товщину листа та форму поверхні виробу необхідно дослідити процес витяжки при контакті заготовки з інструментом та її деформуванні. Для уникнення надмірних витрат при проведенні фізичних експериментів доцільно скористатися методами КЕ, що дозволяють дослідити процес витяжки полімерного матеріалу [9].

Інженерні комплекси, які базуються на аналізі кінцевих елементів високоеластичних матеріалів, це Ansys Polyflow, Abaqus, T-sim, Pam-form тощо. Використання програмного забезпечення для симуляції є дуже ефективним для оцінки деформації пластичного матеріалу до його реального процесу термоформування, особливо з точки зору зниження витрат на інструмент. Теплопередача протягом нагрівання пластику, дія позитивного чи негативного тиску повітря, використання допоміжної оснастки, деформація пластику та інші результати аналізу можна імітувати інженерними пакетами, згаданими раніше. Якщо граничні умови можна точно визначити, моделювання процесу термоформування може дати точні результати для оцінки термоформованого продукту.

На відміну від інших областей обробки полімерів, таких як лиття під тиском, використання комп'ютерного моделювання є досить новим і менш розвиненим методом оцінки при термоформуванні [4]. Термоформери які використовують симуляцію, в більшості випадків працюють зі спеціалізованим програмним забезпеченням T - SIM від Accuform, Cz. В даній роботі розглядається симуляція процесу в середовищі ANSYS PolyFlow. Даний модуль дозволяє вирішувати задачі контакту форми та високоеластичного матеріалу, досліджувати товщину стінок після формування з урахуванням тиску, температури (еластичного стану матеріалу), швидкості руху форми та ін.. Даний модуль здебільшого використовується при дослідженні прес-форм та видувного формування. Інтерес становить саме видувне формування, так як матеріал при даному виді обробки має ідентичний еластичний стан та піддається дії тиску повітря. В даному випадку планується використати плоску заготовку, визначити межі контакту з формою та визначити тиск, що буде діяти аналогічно зниженому.

Для того, щоб визначити, чи метод термоформування підходить для конкретного виробу, необхідно провести техніко-економічне обґрунтування. Для цього формована деталь визначається моделюванням, використовуючи дані CAD систем та симуляцією процесу термоформування. Комп'ютерне моделювання також може визначити, чи будуть компоненти виготовлені разом або повинні виготовлятися окремо. Також необхідно з'ясувати, чи може геометрія поверхні бути досягнута призначеним процесом і які подальші кроки повинні бути інтегровані.

При проектуванні формоутворюючого інструменту, дані, що отримуються моделюванням процесу є визначальними для інструменту в кінцевому рахунку. На

наступних кроках всі процеси - відповідні рухи та їх часові рамки визначені. Програмне забезпечення не має функції оптимізації процесу, тому, ймовірно, необхідно буде виконати певну кількість ітерацій.

Геометрична модель контактуючих поверхонь матеріалу та інструменту. В якості вихідної поверхні інструменту буде використовуватися зовнішня поверхня виробу з додаванням фланцю (шар облою), для забезпечення меж контакту із заготовкою [13]. В якості заготовки - плоска листова поверхня, що відповідає листу полімера. На цій геометрії будується сітка кінечних елементів. Точність розмірів елемента повинна забезпечити відтворення найменших контурів форми. Таким чином найменший елемент на поверхні інструмента це радіус округлення кромки рівний 0,5 мм. Достатнім буде розбити цю частину на 10 ділянок. Тому мінімальний розмір сітки встановимо 0,01 мм. Максимальний розмір обмежимо на рівні 0,1 мм.

Досліджувана поверхня – формований матеріал, проте сітка КЕ будується для обох поверхонь: інструменту та заготовки. Це необхідно для визначення точок контакту інструмента та заготовки. Дослідження процесу буде відбуватися за прийнятою схемою формування – негативне вакуумне термоформування. На Рис. 2.12 наведено розташування заготовки відносно інструмента за прийнятою схемою формування.

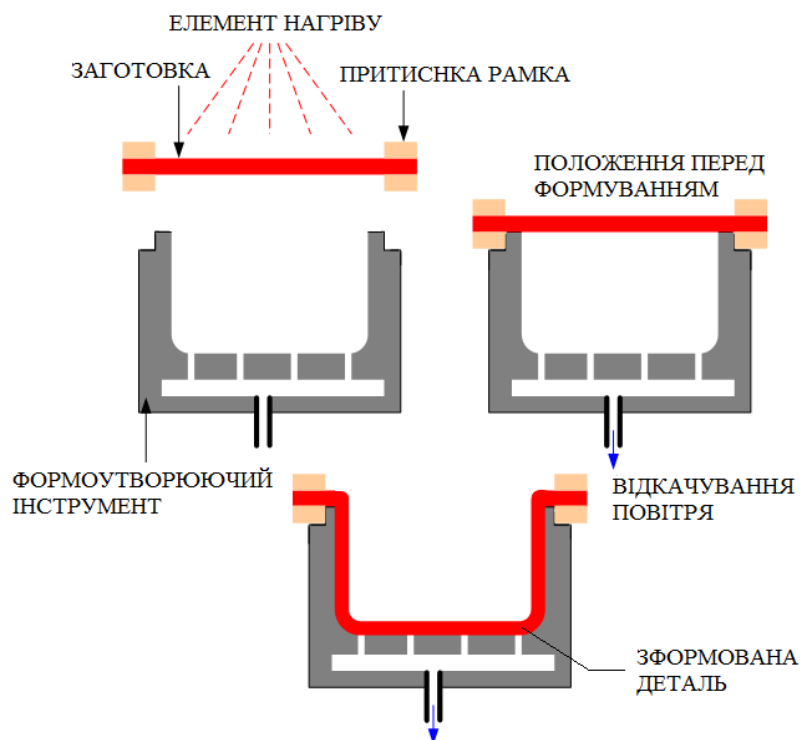


Рисунок 2.12. – Схема процесу формоутворення

Враховуючи, що деталь корпусу симетрична відносно двох- вертикальних координатних площин, будемо використовувати $\frac{1}{4}$ частину вирізу цих поверхонь з метою економії часу розрахунку. Представлення сітки КЕ поверхонь інструменту та заготовки наведено на Рис. 2.13. Поверхні змодельовано таким чином, що поверхня заготовки знаходиться на 15 мм вище поверхні прилягання до фланців

інструменту. Дане положення відповідає початковому моменту часу перед формуванням.

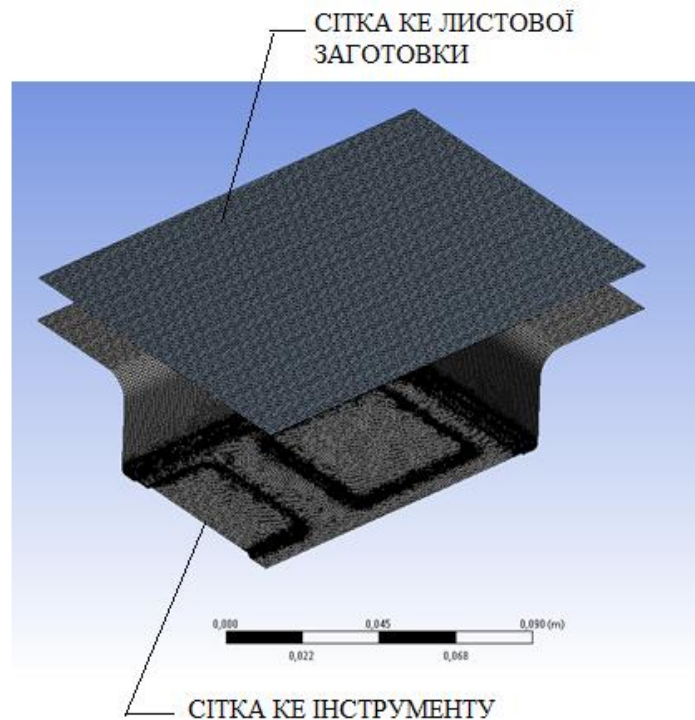


Рисунок 2.13 – Сітка кінцевих елементів інструменту та заготовки

Обмеження та припущення. Задамося обмеженнями границь контакту деталі та заготовки. В даному дослідженні використовується $\frac{1}{4}$ частина вирізу контактуючих поверхонь з огляду на симетричність поверхонь. Таким чином при встановленні геометричних границь слід врахувати, що фіксовані два ребра прямокутної заготовки є нерухомими внаслідок закріплення листа в притискній рамі. Два інших ребра визначають розташування вертикальних площин симетрії, тому границя може змінювати свою форму при контакті з інструментом в межах своєї площини симетрії. Схематично це можна проілюструвати на Рис. 2.14.

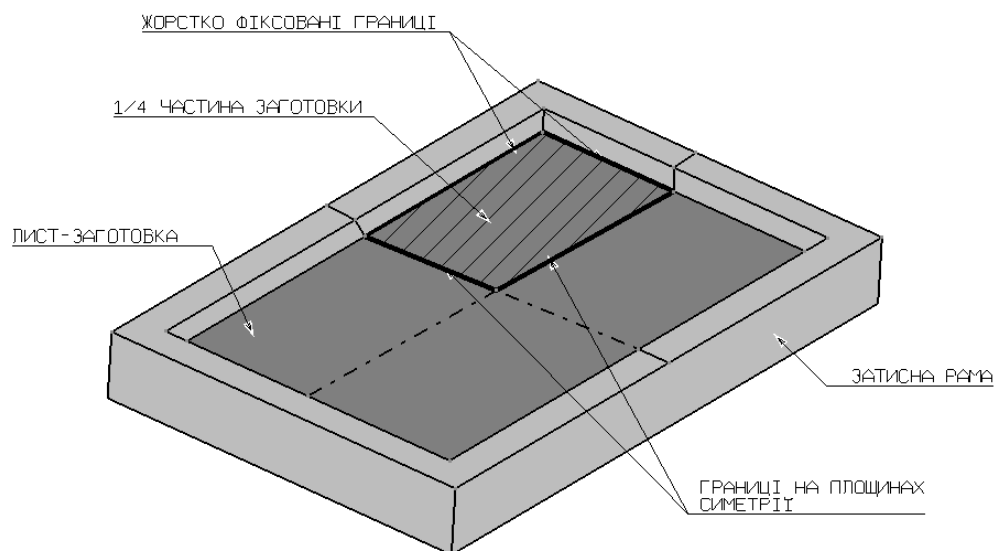


Рисунок 2.14 – Зображення границь контакту поверхні матеріалу

Враховуючи, що в процесі формування, окрім розігріву листа, буде забезпечено підігрів інструменту, будемо вважати процес ізотермічним. Тобто при моделюванні лист вважається рівномірно нагрітим та не розглядається нерівномірний процес передачі тепла від заготовки до інструмента та в навколишнє середовище.

Прогрітий лист вважається ідеальною площиною, прогини в наслідок розширення листа при нагріванні є відносно малими та не враховуються [2, 13, 16].

Таким чином спростована задача дослідження зводиться до виявлення контактів заготовки та форми. За рахунок програмного забезпечення ANSYS Polyflow будуть обчислені динамічні та кінематичні рівняння, що спричиняють зміщення вільної поверхні. Як тільки контакт відбувається, зсув вільної поверхні стає неможливим у напрямку, нормальному до поверхні інструменту. В основі даних обчислень полягають гіпотези механіки неньютонівської рідини, що являє собою суцільне рідке тіло, для якого дотичні напруження внутрішнього тертя, спричиненого відносним проковзуванням (зсувом) шарів рідини описуються нелінійною залежністю від градієнта швидкості у напрямі, перпендикулярному до напрямку проковзування. ANSYS Polyflow дозволяє обчислювати значення динамічного коефіцієнта в'язкості у кожний момент часу моделювання.

Властивості матеріалу та параметри процесу. Будемо використовувати властивості матеріалу на при температурі формування 190°C [13]. Параметри що відповідають АБС пластику:

- Густина - 1,02 кг/м³;
- В'язкість при заданій температурі - $1 \cdot 10^5$ Па · с;
- Вихідна товщина – 6 мм;
- Тиск формування 0,097 МПа буде представлений у вигляді результуючого з атмосферним тиском та складатиме 0,003 Мпа;

Моделювання процесу. Змоделювавши процес отримали характер розподілення товщини стінки та його мінімальне значення – 2,3 мм. Товщина стінки в різні моменти часу формування наведена на Рис. 2.15.

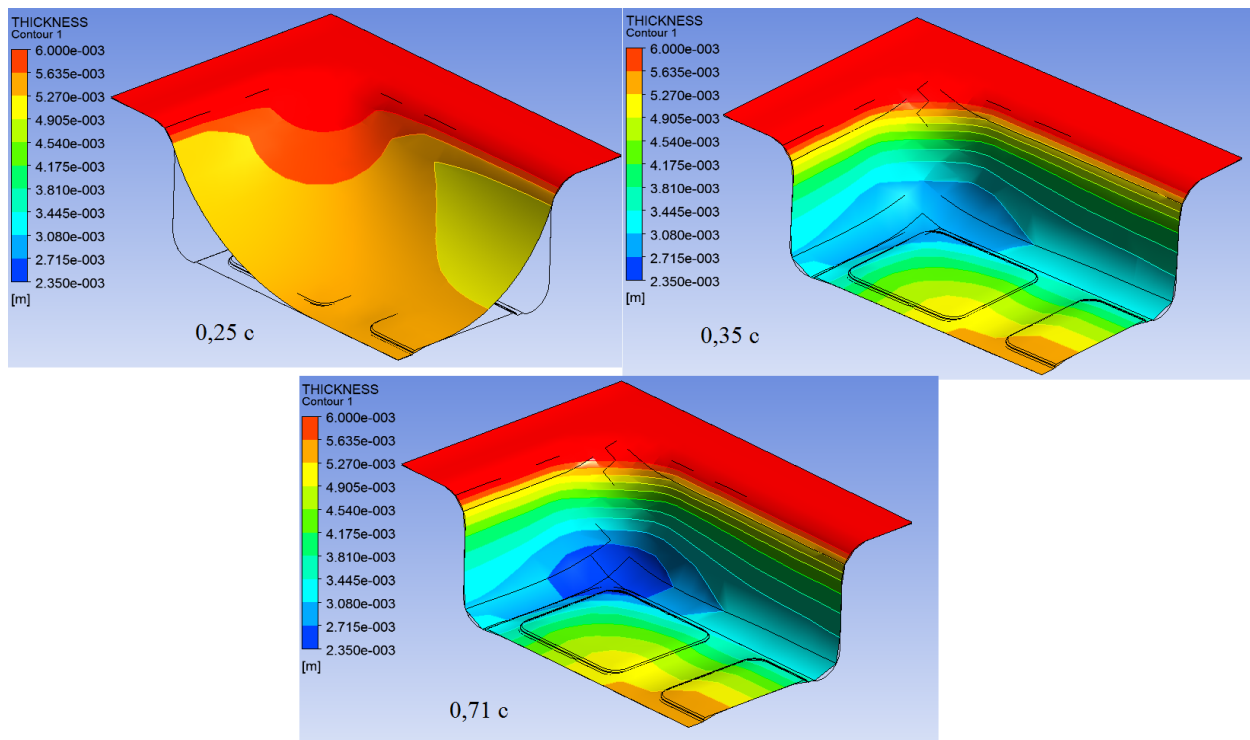


Рисунок 2.15 – Розподіл товщини стінки в процесі формування (лист 6 мм)

Таким чином, робимо висновок, що товщина листа, розрахована за спрощеною методикою не задовільняє вимогам до конструкторської з боку жорсткості. Як видно з наведених рисунків товщина характерно зменшується в місцях переходу поверхонь – кутах виробу. Дослідивши процес крок-за-кроком виявляємо час при якому товщина виробу є задовільною. Це момент часу, коли кути виробу ще не сформовано. Зупинивши процес в цей момент часу та дослідивши його можна зробити висновок, що збільшивши радіуси округлення верхньої кромки можна отримати результат близький до бажаного. Проте не має можливості в високій мірі змінювати бажану геометрію деталі. Приймаємо комплексне рішення:

- Радіус округлення кромки збільшити до 8 мм (Рис. 2.16);
- Товщину листа-заготовки збільшити до 7 мм;
- Нагрів матеріалу проводити на рівні 200°C (в'язкість $0,78 \cdot 10^5$ Па · с).

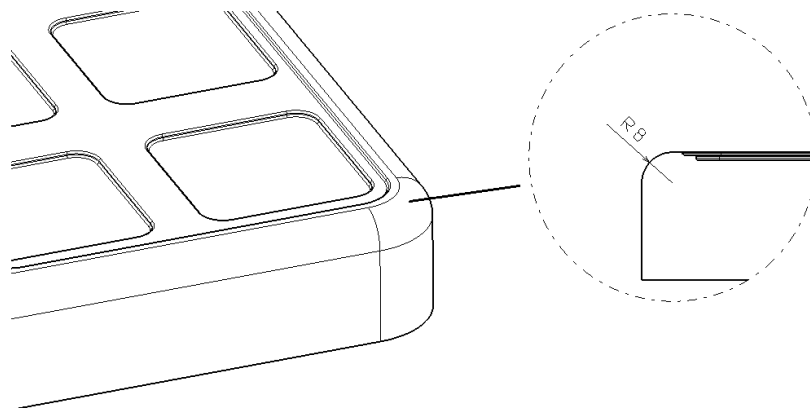


Рисунок 2.16 – Корекція геометрії інструменту

Повторно провівши моделювання за уточненими параметрами отримали мінімальне значення стінки на рівні 2,79 мм (Рис. 2.17).

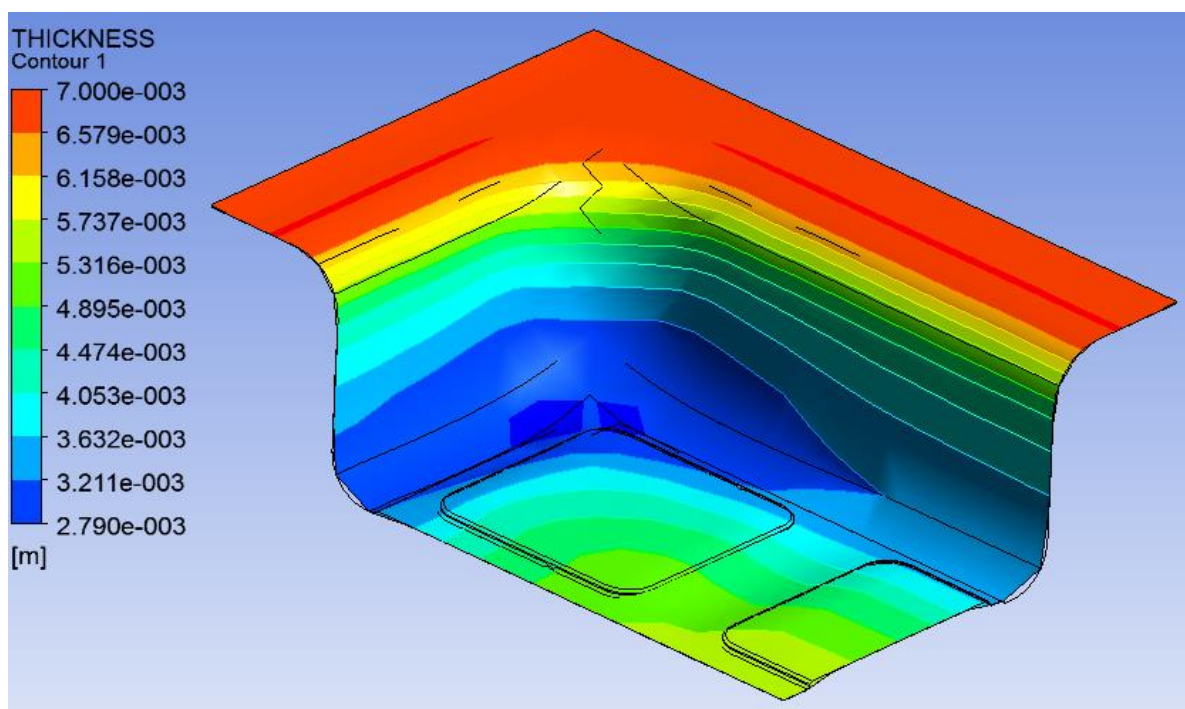


Рисунок 2.17 – Розподіл товщини стінки після зміни параметрів

В результаті аналізу геометрію деталі та інструменту змінено в допустимих межах, товщину листа прийнято 7 мм (при попередніх 6 мм), збільшено температуру прогріву листа. Такий комплекс заходів дозволяє забезпечити успішне проведення випробувань готового виробу. Варто відмітити, що зформована деталь має мінімальну товщину практично в ненавантажених місцях, в зонах дії напружень товщина стінки >3 мм, що створює додатковий запас жорсткості та міцності деталі. В контексті даної задачі немає необхідності збільшувати жорсткість місць потоншень додатковими елементами конструкції.

2.4. Формоутворюючий інструмент

Детально дослідивши процес витяжки матеріалу при термоформуванні отримали оптимальну відкоректовану контактуючу поверхню інструменту, що дозволяє отримати деталь з відповідною мінімальною товщиною стінки. Таким чином контактуюча поверхня буде становити основну формоутворюючу частину. При подальшому оформленні інструменту необхідно додати плоскі фланці навколо формоутворюючої частини, оснастити конструкції інструменту отворами для відведення повітря. Детальне креслення формоутворюючого інструменту наведено в Додатку В.

Матеріал формоутворюючого інструменту. В області термоформування використовуються наступні різновиди матеріалів оснастки:

- Гіпс, неармований або армований скловолокном (в основному при проектуванні виробів);
- Деревина (для отримання обмеженої кількості деталей);
- Поліуретанові або епоксидні смоли;
- Повітропроникні пластмаси із наповненою алюмінієм епоксидної смоли;
- Алюміній в формі плит.

Лише невеликі кількості дослідних зразків виготовляють на недорогій оснастці з деревини або полімерної смоли. Особливо це відноситься до тих випадків, де в першу чергу ставиться тільки питання оцінки майбутньої конструкції виробу. Однак, якщо зразки призначені також для отримання даних, в даному випадку, по розподілу товщини стінки, то необхідно виготовити дослідний одногніздний інструмент, який здатен працювати в умовах виробництва. Виробнича оснастка виготовляється із алюмінію або шляхом комбінування алюмінію за сталлю. Окрім того, задля досягнення заданої якості поверхні виробу технологічний процес передбачає підігрів інструменту. Отже теплопровідність інструменту є одним з чинників вибору матеріалу.

З огляду на вищенаведене алюмінієві матеріали є більш переважними [13, 16]. Для забезпечення високої якості та точності формують поверхню доцільно виготовити інструмент шляхом механічної обробки. Для цих умов потрібно розглядати сплави, що дозволяють легко обробляти їх різанням. Найбільш поширена серія алюмінієвих сплавів за ISO 6361 – це серія 6000. Алюмінієва серія 6000 містить марганець та кремній. Ця комбінація елементів дозволяє сплаву бути термообробленим, що покращує міцність сплавів. Пропонується використовувати найбільш широко застосовуваний сплав 6061 цієї серії. Він зазвичай доступний у попередньо загартованих сортах, таких як 6061-О (відпалений) та загартованих сортів, таких як 6061-Т6 (загартовані і штучно зістарені). Перевага надається 6061-О як матеріалу, що найкраще обробляється різанням та має стабільні характеристики. Основні характеристики матеріалу наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики 6061-О

Матеріал	Густина, г/см. куб.	Питома міцність, МПа*см куб./г	Твердість по Брінеллю	Межа міцності при розтязі, МПа	Модуль пружності, ГПа
6061-О	2,7	114	95	310	69

2.4.1. Конструктивні елементи формують інструменту

Канали видалення повітря. Призматичну конструкцію з формують інструментами та допоміжними поверхнями необхідно оснастити вентиляційними каналами для відведення повітря. Кількість та діаметри каналів для виходу повітря повинні бути достатньо великими, щоб швидко видаляти повітря із зони формування. С іншої сторони, вони не повинні залишати ніяких слідів на поверхні формованого виробу.[13]

Отвори та щілини для видалення повітря (Рис. 2.11) розширюються з протилежної формоутворюючої сторони свердлінням отворів більшого діаметру $d_3 = 4..10$ мм. Випускні отвори на формоутворюючій поверхні d_1 повинні з'єднуватися з більшим діаметром перехідним отвором розміром $d_2 = 2..4$ мм. Типовий розмір діаметру d_1 для негативного вакуумного формування складає 0,8 мм. Якість зпроектованої системи перевіряється дослідним шляхом в залежності від виду обладнання термоформування.

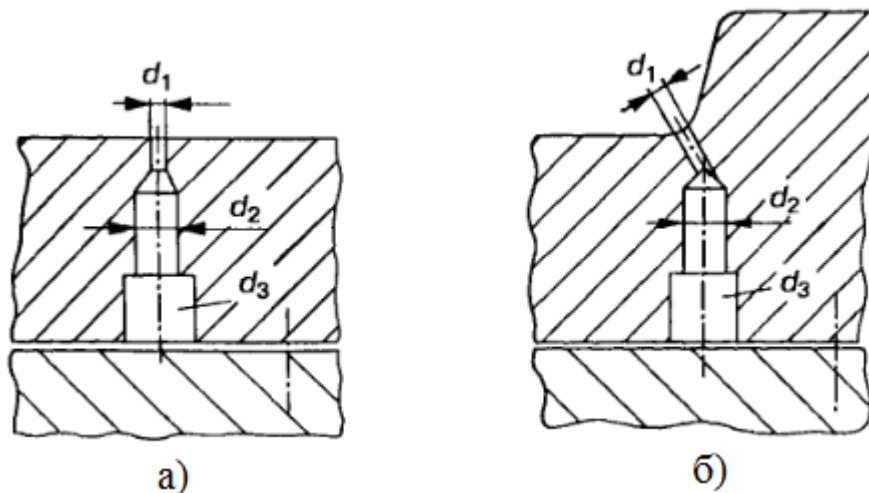


Рисунок 2.10 – Канали для відведення повітря
а – вертикально по відношенню до поверхні форми; б – канал для відведення повітря з внутрішньої сторони «негативного» радіусу

Для забезпечення універсальності використання інструменту на різних вакуумних столах передбачається створення уступу на нижній його поверхні, що виводить всі канали для відтоку повітря до спільної камери відтоку (Рис. 2.11).

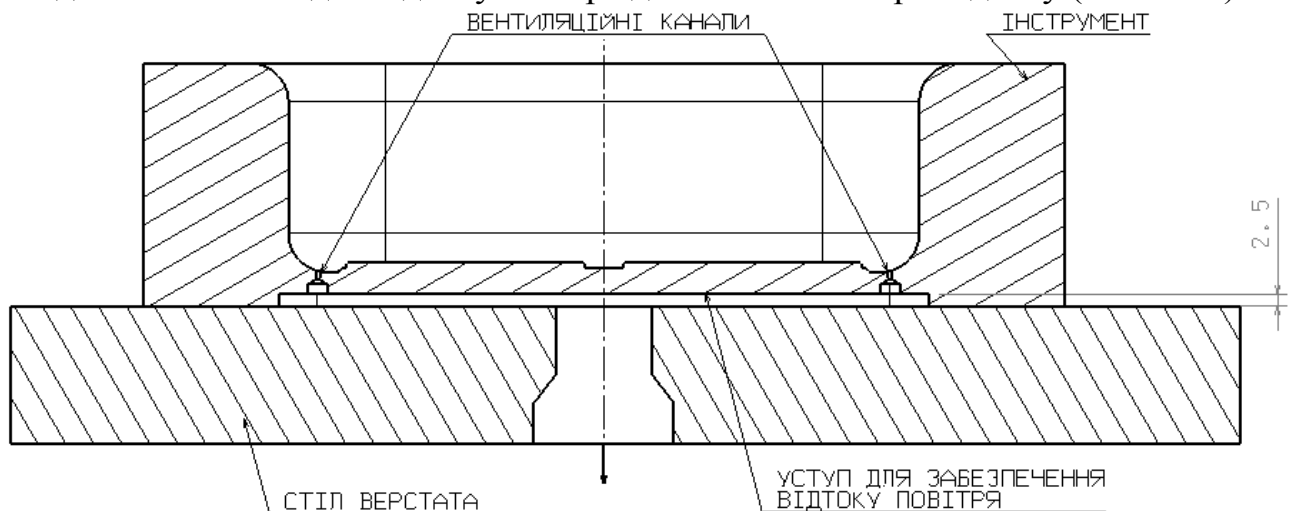


Рисунок 2.11 – Поперечний переріз інструменту

Елементи фіксації на столі верстата. За рахунок дії зниженого тиску повітря інструмент можна вважати надійно зафіксованим. Проте для уникнення його зміщення до початку зниження тиску повітря необхідно передбачити його

попередню фіксацію на столі. Фіксація відбувається за рахунок штифтів, що встановлюються в отвори стола з однієї сторони, та в отвори інструменту з іншої (Рис. 2.11) [1].

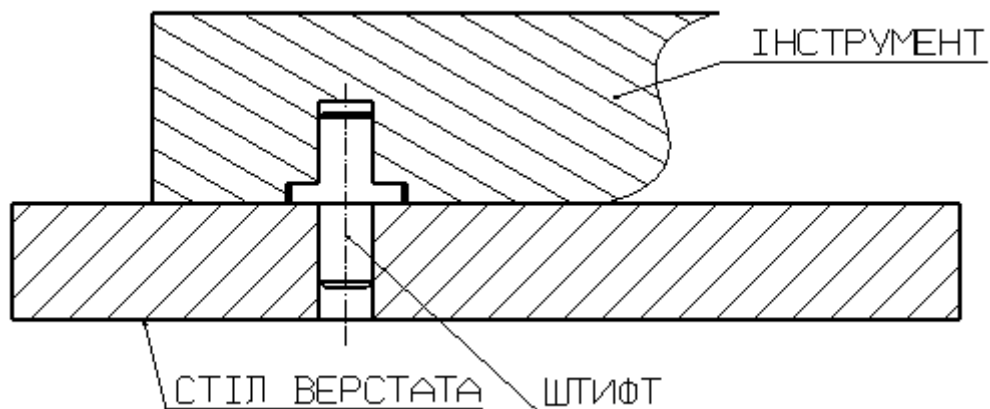


Рисунок 2.10 – Елементи фіксації інструменту на столі верстата

Отже, конструкцію інструменту визначено на основі формоутворюючої поверхні, що була перевірена на коректну роботу шляхом моделювання процесу витяжки. Інструмент оснащено вентиляційними каналами, що забезпечують відтік повітря із зони формування. Наявність уступу дозволяє реалізувати відтік повітря практично на будь-якому столі верстата, що має центральний отвір відтоку. Наявність отворів для штифтів дозволяє фіксувати інструмент на поверхні стола.

3. ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

Результати моделювання необхідно перевірити на відповідність його фізичній моделі. В даному розділі розглядається процес виготовлення дослідного зразка деталі корпусу та аналіз його відповідності заданим характеристикам. Інтерес становить відповідність характеру та величини зміни товщини стінки по поверхні деталі. Адже підтвердивши застосовану методику можливо уніфікувати та стандартизувати в межах підприємства процес проектування виробу та інструменту для подальших проектів. Що, в свою чергу, дозволило скоротити строки проектування та виготовлення інструменту і зменшило б рівень ризиків при виготовленні таких типів деталей.

3.1. Виготовлення дослідного зразка

Для перевірки результатів моделювання необхідно виготовити фізичну модель несучої конструкції корпусу. Для цього потрібно вибрати необхідне обладнання та визначити параметри процесу при вакуумному термоформуванні деталі. Далі наведено опис станції формування листових заготовок з ЧПУ, специфікацію технологічного процесу та його параметри.

Станція формування. Спроектований корпус планується виготовити на обладнанні з ЧПУ серії U (Рис. 3.1). Серія U - розроблена компанією Geiss - надає економічну альтернативну машину для ефективного випуску мінімальної кількості продукту ("U" означає «мілководень») замість стандартного серійного діапазону. Це важливо, тому що серійно на таких машинах виробляють упаковку, а малогабаритні серії обладнання є досить вигідними в економічному плані для випуску технічних деталей, невеликих за розміром. Окрім того, такий тим обладнання дозволяє розмістити заготовку в виді листа товщиною понад 2,5 мм. Характеристики обладнання наведені в табл. 3.1.

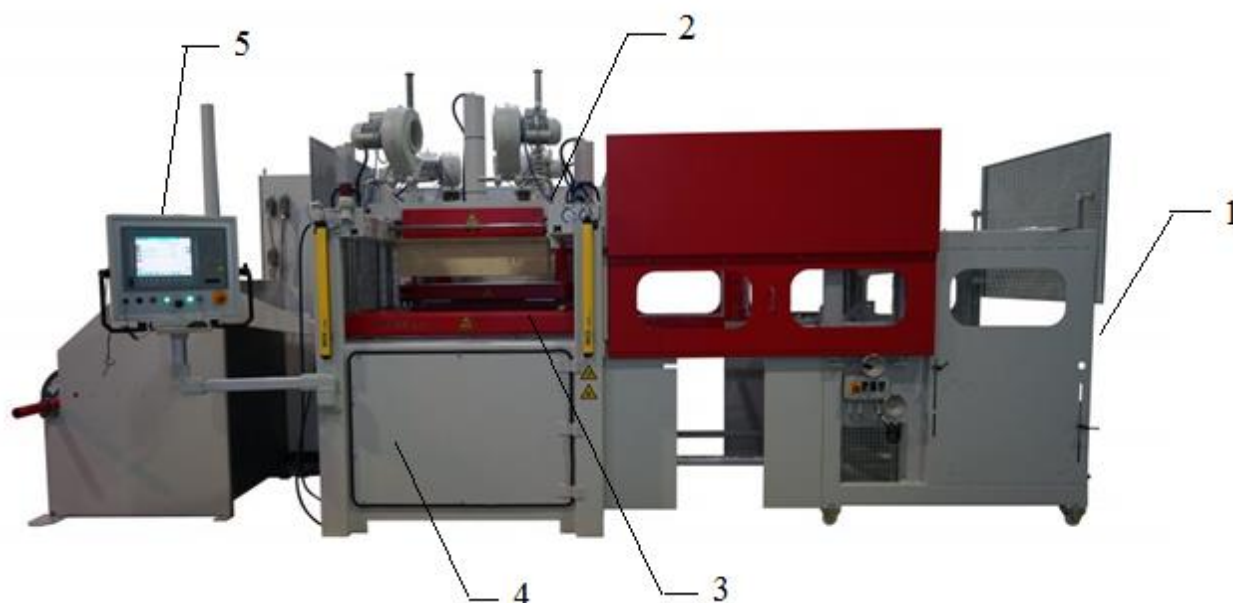


Рисунок 3.1 – Термоформувальна станція

Відповідно до Рис. 3.1 станція формування має зону завантаження та розміщення листових заготовок 1. Лист, що підлягає формуванню переміщається та закріплюється по краям рамкою в зоні 2. В зона 2 під дією нагрівних елементів відбувається прогрів листа, одночасно з цим відбувається прогрів інструменту до робочої температури в зоні 3. Досягши температури формування рамка із розігрітою заготовкою переміщується в зону 3 та фіксується початковий контакт листа з фланцями інструменту. Під дією вакуумного обладнання 4 відбувається відкачка повітря із простору замкнутого з однієї сторони заготовкою, а з іншої формуючим інструментом. Відбувається процес формування, після чого вимикається вакуумне обладнання. Потім зформована деталь залишається на формі та охолоджується без сторонніх засобів. В цей момент в матеріалі проходить вирівнювання структури, перебудова макромолекул. Такий процес знімає більшу частину залишкових напружень. Деталь при температурі 40-50 градусів знімають через вікно виходу над зоною 3. Надалі деталь піддають обрізним та фінішним операціям.

Таблиця 3.1 - Характеристики обладнання

Характеристика	Одиниці виміру	Тип	Значення необхідне для процесу
		1000x600	300x300
Максимальний розмір листа	мм	1000x601	300x300
Габарити формування	мм	960x560	270x190
Глибина формування	мм	400	50
Максимальна величина прогріву	С	300	100
Підігрів робочого столу	С	150	70

Технологічний процес. Технологічний процес виготовлення деталі є адаптованим під використовуваний матеріал та конструкцію деталі. Так, за рахунок вибору в якості матеріалу забарвленого АБС пластику, негативному типі формування та підігріву форми з технологічного процесу виключаються такі операції як фарбування, ламінування чи нанесення захисного покриття.

Послідовність виконуваних операцій та їх характеристики наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Технологічний процес

Заготовка	Вид	Лист	Верстат	GEISS U TYPE MACHINE
	Розміри	300x300		
	Матеріал	ABS		
Технологічний процес				
Вид операції	Операція	Характеристика		Час виконання
Підготовча	Розігрів:			хв
	форми	70С		1,5
	листа	200С		
Переміщення	Опускання листа	0,15 м/с		0,12
Формоутворення	Формування деталі	0,003 Мпа		0,015
Супутня	Охолодження форми	40С		1,5
Заклучна	Зняття з форми	0,1 м/с		0,12
Післяформувальні операції				
Обрізна	Вирізання лазером	6 пазів, 12 отворів, 6 вирізів		---
Фінішна	Маркування	---		---
Фінішна	Упаковка	Пакувальна плівка		---

Дослідний зразок деталі корпусу. В результаті проведених операцій було виготовлено дослідний зразок за встановленими параметрами (Рис. 3.2). Впершу чергу було встановлено відповідність зовнішніх форм та їх стану. Як видно з рисунку поверхня є глянцевою, з чіткими контурами. Короблення корпусу – відсутнє. Попередньо в якості матеріалу корпусу було обрано АБС пластик та схему формування, що дозволила б отримати глянцеvu поверхню чорного кольору. За цими параметрами деталь є задовільною, що виключає подальші операції фарбування та нанесення покриття. Таким чином ряд умов технічного завдання виконано.

Далі необхідно перевірити забезпечення мінімальної товщини стінки у відповідності до результатів моделювання. Для цього потрібно розробити схему вимірювання фізичної моделі в місцях найменшого потоншення стінки.



Рисунок 3.2. – Тестовий зразок деталі «корпус»

3.2. Методика проведення дослідження

Загальні положення. Перш за все досліджується стан моделей при аналізі жорсткості та симуляції витяжки. При аналізі товщини необхідно знайти найбільш навантажені ділянки при проведенні випробування та зони найбільшого потоншення деталі. Після цього робиться висновок про доцільність обрання дослідних точок. На Рис. 3.3 (а) наведено найбільш навантажені зони деталі при проведенні досліджень, на Рис. 3.3 (б) показано зони найбільшого потоншення стінки.

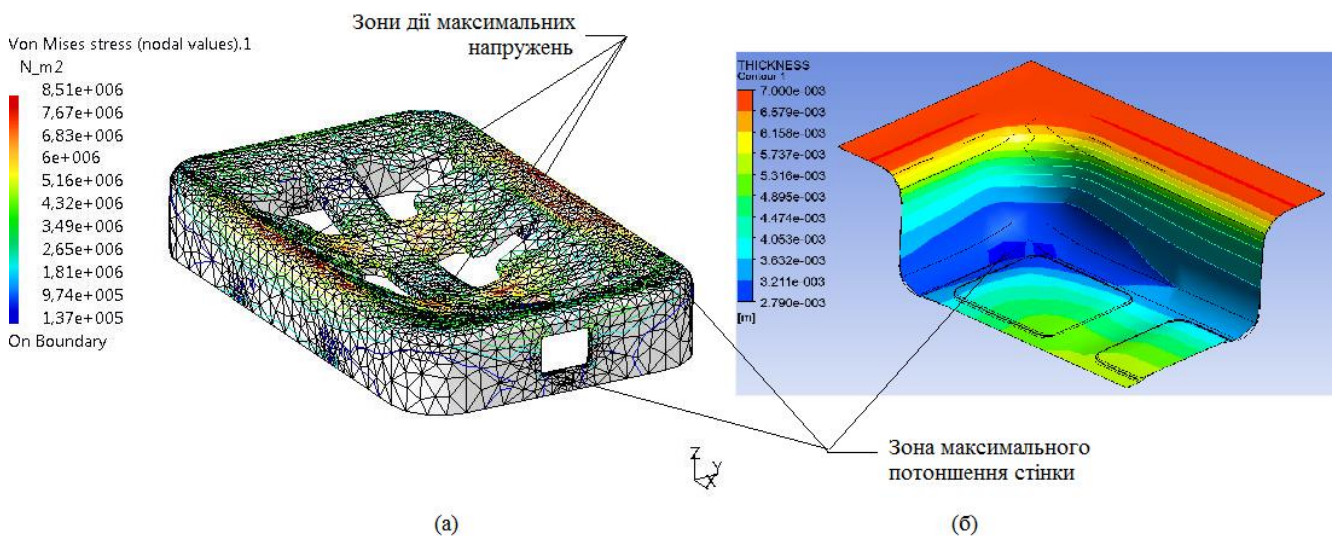


Рисунок 3.3. – Зони дії максимальних напружень та максимального потоншення стінки

Як бачимо з наведеного рисунку в зоні дії максимальних напружень матеріал за результатами моделювання має товщину стінки в діапазоні від 3,5 мм до 4,47 мм. При розрахунку на жорсткість було враховано однорідну товщину стінки 2,75 мм. Тобто дійсні значення напружень в цих місцях будуть нижчими, що створює запас міцності. При виконанні дослідження слід переконатися в достовірності розрахованої товщини в цих місцях.

Зона максимального потоншення знаходиться в місці дії середніх випробувальних напружень. З точки зору розподілення напружень ці місця не є особливо небезпечними, однак, якщо розглянути випадок естремального потоншення в цьому місці – дійсні значення напружень зростуть. Тому в цих місцях також варто переконатися, що забезпечується мінімально-допустима товщина.

Досліджувані точки. На основі вищенаведеного приймаємо наступні перерізи деталі в якості дослідних (Рис. 3.4).

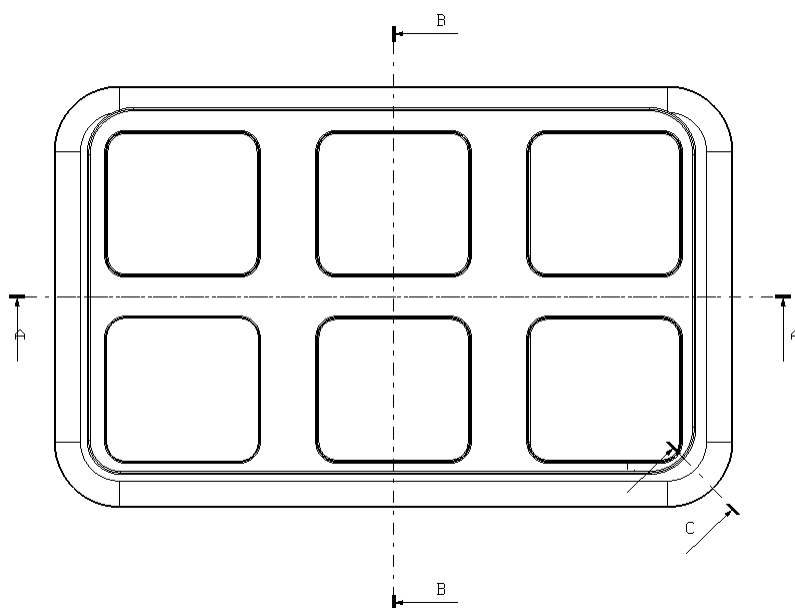


Рисунок 3.4 – Розташування перерізів для вимірювання товщини стінки

Далі на профілі кожного перерізу визначимо ряд точок профілю в яких буде проведено вимірювання на фізичній моделі для порівняння з результатом моделювання. На Рис.3.5 наведено схему розташування точок профілю в кожному перерізі.

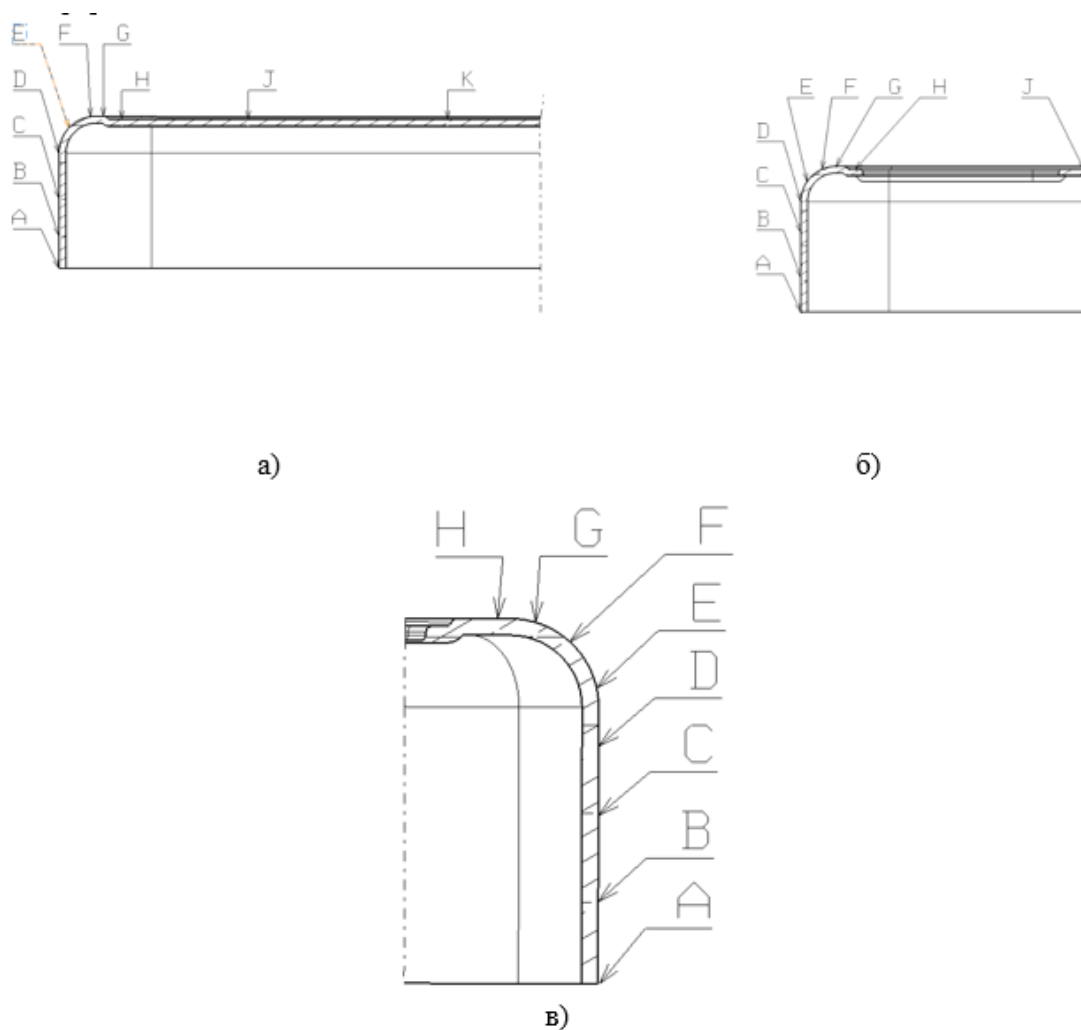


Рисунок 3.5 – Розташування дослідних точок на перерізах деталі
а – переріз А-А; б – переріз В-В; в – переріз С-С

Висоту досліджуваних точок на профілі занесемо до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Висота досліджуваних точок на профілі
перерізів

Переріз	Висота точки, мм									
	А	В	С	Д	Е	F	G	Н	Ј	К
А-А	0	8	16	24	28	33	33	32.5	32.5	32.5
В-В	0	8	16	24	26	30	33	32.5	32.5	---
С-С	0	8	16	24	26	30	32	33	---	---

Вимірювальний інструмент. Відштовхуючись від допуску на товщину матеріалу $\pm 0,1$ мм, обираємо інструмент для вимірювання з похибкою в 10 разів точніше. Для вимірювань фізичної моделі буде використовуватись електронний штангенциркуль типу Mitutoyo Caliper SERIES 500. Основні характеристики вимірювального засобу наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.4 – Характеристики вимірювального приладу

Засіб вимірювання	Роздільна здатність, мм	Діапазон вимірювання, мм	Точність вимірювання, мм
Caliper SERIES 500	0,01	0-150	$\pm 0,01$

3.3. Перевірка результатів моделювання.

Основною задачею розділу є зіставлення результатів реального дослідного зразка з результатом моделювання процесу. Маючи поверхню і контури розподілення товщини визначені в Розділі 2 та фізичну модель зведемо їх до єдиної методики вимірів. В ряді перерізів деталі проводимо вимірювання товщини стінки та порівнюємо його з отриманим значенням з моделі.

Переріз А-А. Із середовища ANSYS Polyflow експортуємо координати точок профілю, що розташований по осі симетрії деталі. Відповідно до заданих точок наносимо дані на графік (Рис. 3.6). Аналогічно заносяться виміри фізичної моделі. Як видно з графіка – мінімальна товщина стінки знаходиться в точці F і сягає значення 2,95 мм. Розрахункове значення в даній точці становило 2,79 мм. Загалом прослідковується спільний характер зміни товщини стінки як для моделювання так і реального зразка.

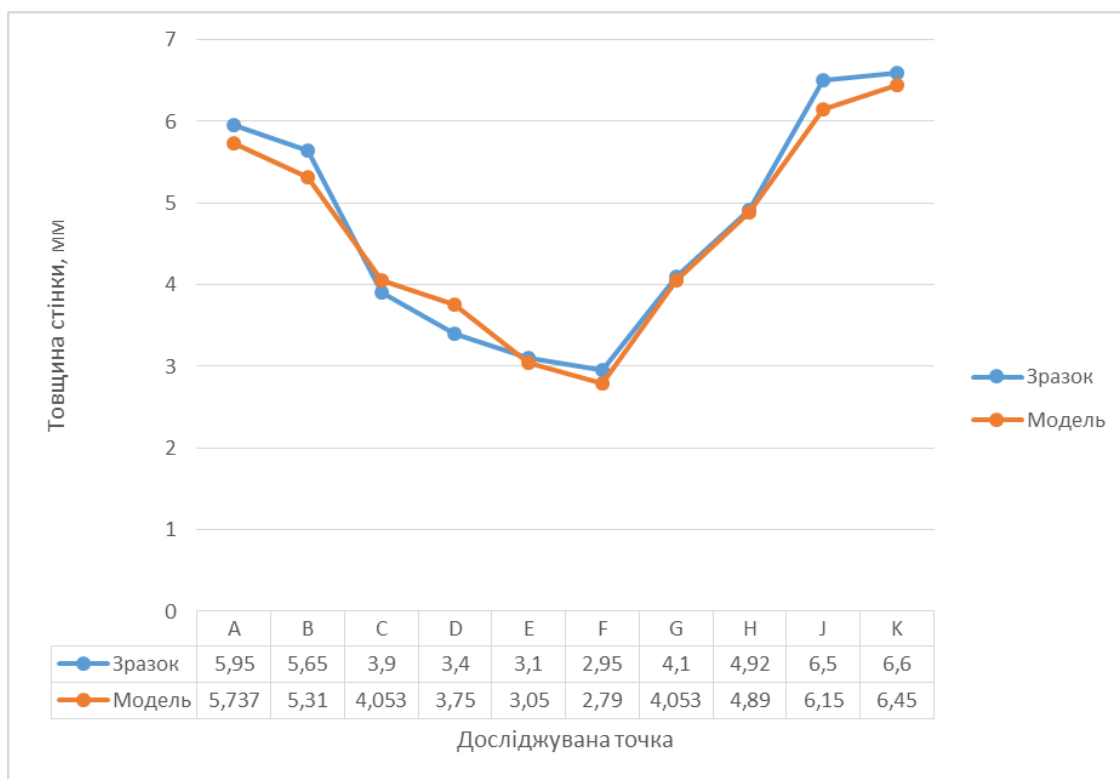


Рисунок 3.6 – Товщина стінок в перерізі А-А

Серед отриманих значень визначимо загальний спад товщини Δt_{max} від початкової товщини листа t :

$$\Delta t_{max} = t - t_{min} = 7 - 2.95 = 4.05 \text{ (мм)},$$

де $t_{min} = 2,95$ – найменше виміряне значення товщини фізичної моделі.

Таким чином в процесі витяжки матеріал отримав відносне потоншення δ :

$$\delta = \frac{\Delta t_{max}}{t} \cdot 100\% = \frac{4,05}{7} \cdot 100\% = 57,85 \%$$

Порівняємо відносне потоншення деталі із загальним коефіцієнтом витяжки K_B за площею формування:

$$K_B = \frac{F_2 - F_1}{F_1} \cdot 100\% = \frac{0,088}{0,06} \cdot 100\% = 46,6 \%,$$

де $F_1 = 0,06 \text{ м}^2$ – площа поверхні матеріалу заготовки;

$F_2 = 0,088 \text{ м}^2$ - площа поверхні формованого виробу;

Різниця в показниках вказує на те, що товщина стінки деталі змінюється не пропорційно зміні площі та може сягати меншого значення ніж очікуване, якщо оцінювати процес тільки параметрами витяжки. З цього випливає, що при формоутворенні складних за формою та/або відповідальних деталей необхідно надавати перевагу більш детальним методам оцінки витяжки та таким, що враховують саме особливості форми майбутньої деталі.

Переріз В-В. Представимо значення дослідного зразка та моделі у вигляді одного графіка (Рис. 3.7). Як бачимо в поперечному перерізі не має екстремального потоншення стінки. Це пов'язано з тим, що в цьому місці прослідковується чітке виокремлення лише двох основних поверхонь витяжки і воно знаходиться на найбільшому віддаленні від кутів корпусу.

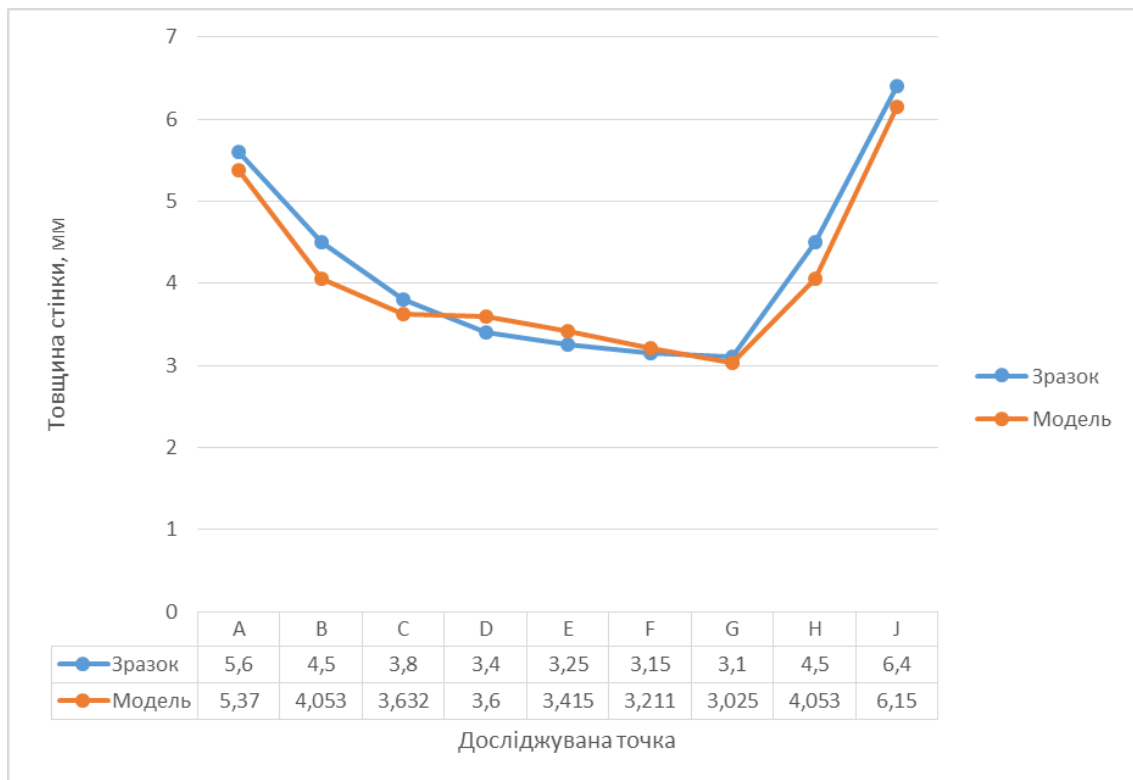


Рисунок 3.7 – Товщина стінок в перерізі В-В

Переріз С-С. Даний переріз розташований в найменш навантаженій зоні, проте в саме в цьому місці спостерігається значне падіння товщини. Графік зміни товщини стінки наведено на Рис. 3.8.

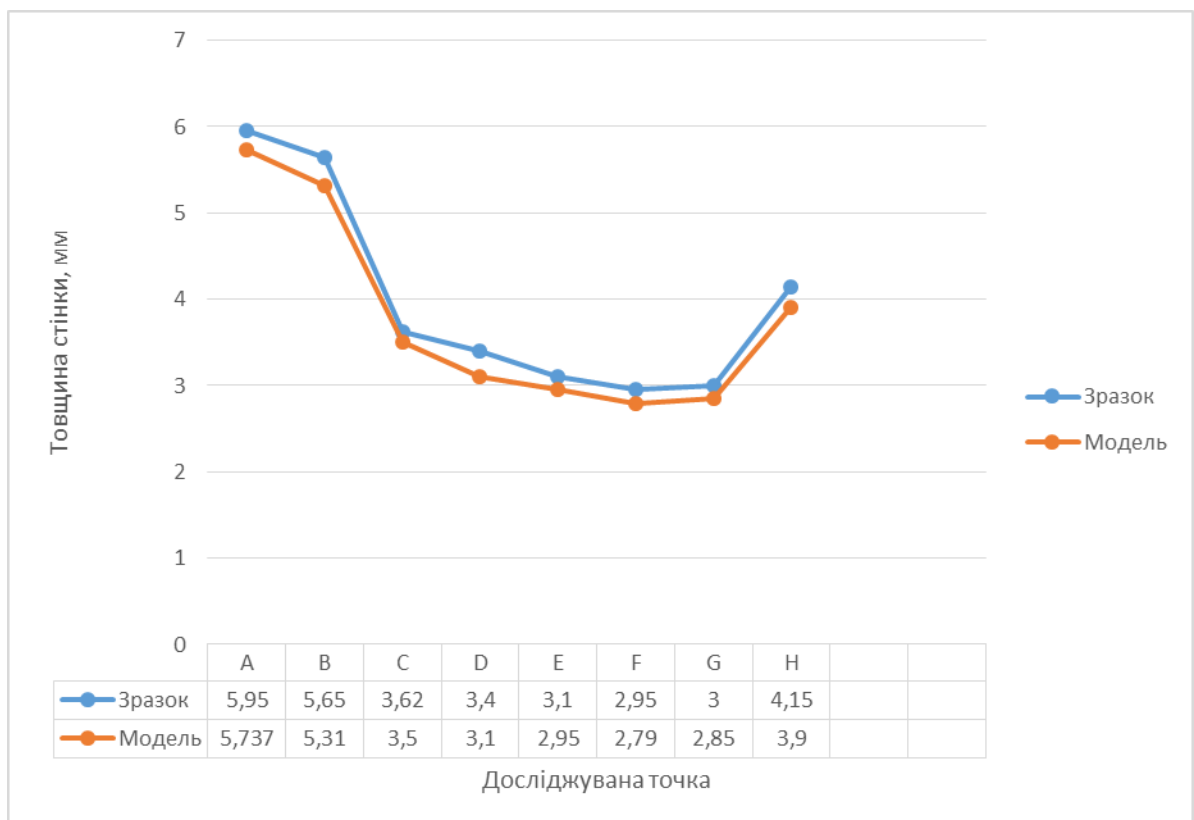


Рисунок 3.8 – Товщина стінок в перерізі В-В

Отримали аналогічну кореляцію результатів за характером розподілу. Характерною особливістю даного перерізу, що потоншення представлене не в одній точці, а на протязі групи точок від D до G з максимальним потоншенням в точці F (2,95 мм) та плавним розподілом товщини навколо неї (2,95..3,1 мм). Характерною особливістю перерізу є відсутність потоншення починаючи з точки H (4.15 мм). Одразу завершення зони переходу поверхонь товщина стінки є більш стабільною та стійкою.

Отже, за результатами проведеного порівняння можна підвести такий підсумок:

- 1) Характер розподілення товщини має спільні риси при моделюванні процесу та дослідженні фізичної моделі корпусу. Спрощена методика не може використовуватися при оцінці зміни товщини деталі. Вона може лише слугувати відправною точкою для подальшого моделювання процесу.
- 2) Отримані значення товщини реальної деталі є дещо більшими за розрахункові. Максимальна різниця показників вимірів менше 10%. Це можна пов'язати з наступними чинниками:
 - a. При моделюванні процесу не враховувався допуск товщини листа заготовки;
 - b. Неможливість забезпечити абсолютно однакового розігріву форми та контролю температури;
 - c. При моделюванні не врахована усадка матеріалу;
 - d. Різниця в реальному значенні тиску формування та розрахунковому;
 - e. Неоднорідність матеріалу, наявність включень;
 - f. При моделюванні процес вважався ізотермічним, тобто не враховувалась передача тепла від заготовки до інструменту, що змінювало показники пластичності матеріалу.
- 3) За результатами, в цілому, можна зробити висновок, що моделювання процесу витяжки є виправданим засобом оцінки розподілу товщини стінки на етапі проектування виробу. В будь-якому випадку такий метод є більш ефективним та економічно вигідним ніж проведення ітерацій на реальному обладнанні.

Параметри впливу на зміну товщини стінки на поверхні деталі. Після встановлення відповідності результатів моделювання фізичній моделі стає можливим виділи шляхи впливу на характер та величину зміни товщини стінки деталі відносно початкової товщини заготовки.

При виконанні даного проекту було успішно приведено існуючу конструкцію корпусу до технології вакуумного термоформування пластику. На основі цього був розроблений формоутворюючий інструмент. Головний негативний момент при цьому – це нерівномірність розподілу товщини стінки на поверхні деталі. В попередніх розділах згадувалось про шляхи впливу на цей розподіл. Доцільно систематизувати ці методи за видами впливу:

- 1) Вплив на зміну товщини завдяки властивостям матеріалу. Перш за все це правильний вибір марки матеріалу залежно від конкретних умов формоутворення. Другий крок – корекція початкової товщини листа.
- 2) Вплив на зміну товщини завдяки зміні параметрів процесу. Сюди варто віднести вплив на температуру формування і тиск. Загальна практика показує, що зміна цих параметрів викликає не тільки зміну товщини, а і на форму та якість зовнішньої поверхні.
- 3) Вплив на зміну товщини за рахунок раціональної конструкції інструменту. В цьому випадку, заздалегідь знаючи, що існують місця істотного потоншення деталі, надавати інструменту такої форми, де б кількість цих місць була мінімальною. Визначити оптимальні радіуси та кути спряження поверхонь.

При виготовленні фізичної моделі змінам підлягали всі три пункти в якості компромісного рішення. І варто сказати, що перші два мають досить вузький діапазон змін з однієї сторони та можливість кардинально змінити процес з іншої. Так як зміна цих показників суттєво обмежена можливостями матеріалу і не дозволяє досягти значних результатів. Правильний вибір цих параметрів дозволить уникнути небажаних явищ при формуванні деталей, таких як розриви, екстремальні потоншення, зміна забарвлення та інші якості деталі. Тобто ці параметри не повинні коригувати процес задля забезпечення бажаної конструкції виробу. Таким чином не варто завдавати великих змін в параметри процесу. Доцільно визначати їх від потреб формованого матеріалу в першу чергу.

Корекція та вибір правильної форми інструменту в свою чергу залежить лише від конструкції виробу та технологічних вимог. Зміна параметрів інструменту дає широкий діапазон змін товщини не змінюючи при цьому загальне протікання процесу. Тому визначимо конструкцію інструменту як першочерговий елемент для впливу на зміну товщини деталі у подальшому. Заздалегідь знаючи небезпечні місця виникнення потоншень та розривів можливо, змінюючи форму інструменту, впливати на характер витяжки в цих місцях таким чином, щоб зміна товщини відповідала поставленим умовам.

Окрім зміни форми інструменту параметром є його температура. В зв'язку з цим теплопровідність матеріалу інструменту також є важливим фактором при проектуванні. Адже заготовка при контакті з інструментом починає передавати тепло від листа до інструмента. Із моделювання процесу відомо, що контакт відбувається поступово по всій поверхні. Таким чином в місцях першочергового контакту відбувається суттєва зміна процесу витяжки. А саме більш охолоджені частини матеріалу, що першими вступили в контакт з інструментом, сповільнюють витяжку і змушують більш нагріті частини матеріалу зазнавати більших деформацій. Даний фактор може розглядатися як метод впливу на розподіл товщини по поверхні деталі в процесі витяжки.

Рекомендації із застосування результатів моделювання. Із проведених досліджень можна зробити висновок, що процес вакуумного термоформування може успішно застосовуватись для виготовлення деталей корпусу. Важливою задачею є моделювання процесу витяжки, що дає інформацію про розподілення

товщини стінки на поверхні виробу. Отримані дані доцільно використати при проектуванні інструменту та вибору товщини листа заготовки.

Однак варто відмітити ще один важливий аспект використання даних моделювання. Мова йде про взаємо-відносне проектування деталей продукту. Деталь несучої конструкції корпусу, як і будь-які деталі, що отримано термоформуванням можуть контролюватися за розмірами лише тих елементів, які контактують з формоутворюючим інструментом. Проте в даному випадку, окрім зовнішніх поверхонь в конструкції приладу використовуються і її внутрішні поверхні також. При розробці корпусу це прослідковується при проектуванні нижньої кришки, що повинна кріпитися за рахунок «пружних» кнопочних замків. Кришка розташовується в зоні внутрішньої поверхні несучої конструкції. Контур кришки повинен відповідати формі внутрішньої поверхні (Рис. 3.9). Проте, при проектуванні виробу було істотно не відомо, який характер розподілення товщини стінки несучої конструкції. Це може викликати ситуацію непрацездатності з'єднання типу замок, виникненню надмірних зазорів між кришкою та корпусом.

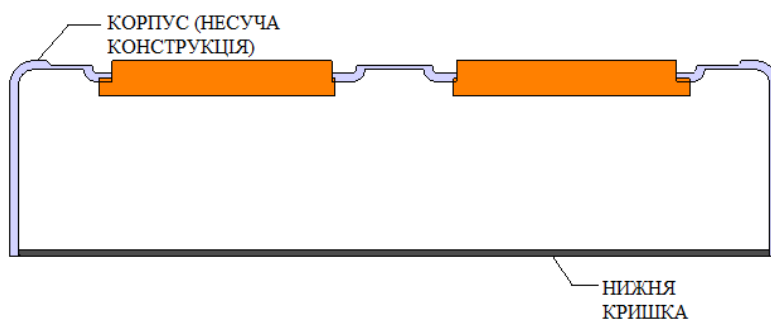


Рисунок 3.9 – Поперечний переріз корпусу

Провівши моделювання процесу і визначивши товщину стінки в місці встановлення елементів корпусу на несучу конструкцію можливо уникнути небажаних результатів та зниження якості виробу адаптувавши розміри кришки під форму внутрішньої поверхні корпусу після моделювання.

Отже, завдяки можливостям МКЕ моделювання можливо забезпечити не лише відповідність виробу стандартам та заданим параметрам, а і його споживчу якість в плані ергономіки.

4. МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМОФОРМУВАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Опис ідеї проекту

Ідеєю проекту є дослідження, удосконалення та впровадження технології вакуумного термоформування при малосерійному виробництві полімерних деталей.

Дослідження технології показано на прикладі деталі корпусу електропристрою, а саме утворення шляхом термоформування несучої тонкостінної призматичної конструкції із заданими робочими площинами для утримання елементів. При цьому в проекті розглянуто шляхи впливу на характер розподілу товщини стінок.

Сучасний ринок полімерних корпусів досить широкий, адже сучасні можливості використання електроніки та електротехніки є доступними, при цьому з'являється велика кількість «брендів». Все це насамперед викликано стрімким розвитком виробників, що пропонують свою продукцію для вузьких галузей застосування. При чому саме оболонка виробу є одним з найважливіших факторів конкурентної боротьби. Це пов'язано з широкою освоєністю функціональних технологій, що застосовуються в цих галузях. Різні виробники пропонують досить близькі за характеристиками прилади, отже вирішальними стають показники якості, зовнішнього вигляду і, особливо, кінцевої ціни для користувача. Нерідко прилади, що мають оригінальний дизайн та «впізнаваність» є непопулярними через значне відображення в ціні витрат на виготовлення корпусу. Натомість використання універсальних полімерних корпусів не дає можливості впровадити власний стиль компанії в дизайні корпусу. Таким чином постала задача пошуку компромісу між бажаною формою для виробника та витратами, що необхідні для її впровадження.

Найбільшою мірою освітлені проблеми стосуються виробів, що мають об'єм випуску менше 1000 шт. в рік. Так як складова частина витрат на проектування та виготовлення оснастки в такому випадку може сягати 90% від собівартості корпусу. Актуальною галуззю використання термоформованих корпусів є область мілкосерійної електротехніки, а саме – професійна аудіоапаратура та супутнє обладнання для неї. Не виключається можливість впровадження і в таких галузях як медична, аерокосмічна, автомобілебудування.

На відміну від існуючих технологій лиття та пресування запропонована технологія дозволяє зменшити витрати на проектування та виготовлення оснастки і досягти при цьому бажаних контурів форми корпусу, підвищити ефективність технологічного процесу, що безпосередньо позитивно вплине на загальні капіталовкладення та вартість готового продукту в цілому. Окрім того такий метод обробки як вакуумне термоформування характеризується високою точністю та якістю формованої поверхні, що безумовно надає цьому методу перевагу над іншими методами швидкого прототипування.

Формоутворюючий інструмент матиме робочу поверхню, що контактує з поверхнею заготовки. Вихідними даними для цієї поверхні є власне конструкція корпусу. Таким чином, майбутня деталь матиме практично всі елементи несучої конструкції, що властиві типовим корпусам, проте дасть можливість формувати бажані контури та обводи корпусу для кожного конкретного замовника. Це реалізується за рахунок значно нижчої вартості інструменту для термоформування в порівнянні з литтям та пресуванням. Особливість процесу термоформування полягає в тому, що необхідна форма виробу досягається процесом витяжки матеріалу. Таким чином утворюється тонкостінна деталь, окрім того, стінка не має стабільної товщини, з'являються локальні потоншення деталі в місцях переходу поверхонь. На основі проведених досліджень пропонується методика проектування інструменту, що дозволила б контролювати товщину стінок в найбільш небезпечних місцях. Це, в свою чергу, накладає певні обмеження на оптимальну конструкцію формоутворюючого інструменту і корпусу відповідно. Тому розробляти конструкцію необхідно з огляду на процес формування.

Таким чином, запропонована ідея дозволяє підприємству отримати точний та міцний корпус для конкретного приладу, що буде відповідати вимогам дизайну компанії та включатиме всі необхідні елементи в кожному конкретному випадку, не зазнавши значних економічних затрат за рахунок ефективного технологічного процесу, використанні напів-автоматичного та гнучкого обладнання, зниження трудомісткості на виготовлення продукції. При такій системі умов монолітна конструкція є не недоліком, а перевагою і підвищені витрати на сировину компенсуються в повній мірі.

Можливі напрямки застосування. Запропонована ідея розрахована на вузькі сфери промисловості, так як в більшості випадків технологія термоформування є ефективною при випуску деталей до 1000 шт. в партії (до 4000 в окремих випадках). Проте, окрім сфер наведених вище на кожному підприємстві виникає потреба малосерійного випуску деталей. Таким чином можемо виокремити основні напрямки застосування технології термоформування:

- Виробництво продукції, обсяг випуску якої за весь життєвий цикл не перевищує однієї тисячі штук. Зазвичай це об'єкти спеціального приладобудування, тривалість випуску яких визначається конкурентною боротьбою, а обсяги випуску - заздалегідь відомим числом споживачів.

- Виробництво випереджальних партій продукції паралельно з процесом підготовки масового виробництва і основного інструментального оснащення. Це характерно для комплексних виробів загального приладобудування, де тривалість виходу нового виробу на ринок значна, а фактор лідерства на ринку по виходу оновленої продукції має критичне значення.

- Виробництво малих серій і дослідних партій високотехнологічних і / або наукоємких об'єктів з метою проведення маркетингових досліджень або попереднього тестування. Зазвичай це об'єкти масового виробництва, де конкуренція на рівні функціональних властивостей досягла своєї межі. У даній ситуації на перше місце в боротьбі за переваги споживача виходять ергономіка

і дизайн, зовнішній вигляд і упаковка. За допомогою попереднього тестування знижується комерційний ризик, причому на перше місце виходять тимчасові втрати в порівнянні з матеріальними. Обсяг цих партій коливається в основному від 10 до 2000 шт. –

•Виробництво дослідних партій продукції для попередніх, оціночних та інших видів випробувань. Метою є отримання деталей, що визначають споживчі якості всього виробу, що впливають на безпеку експлуатації, або визначають вплив інших факторів, регламентованих законодавством. Для вирішення даного завдання використання матеріалів-замінників неприпустимо. Крім матеріалів, для виробництва виробів даної групи використовують ті ж самі технологічні процеси, що і в основному виробництві.

З вищенаведеного можна виділити два основні випадки застосування технології термоформування: виготовлення продукції малими партіями та випуск партії дослідних зразків. Випуск дослідних партій є не менш актуальним, так як за таких умов виробник, що має великі партії випуску продукції зацікавлений отримати продукцію для тестування та оцінки з найменшими витратами. Так як випуск продукції такого типу відбувається лише на етапі впровадження нового продукту, то більшість виробників не розміщує на своїх потужностях обладнання для малосерійного випуску, адже для конкретного виробника час його використання буде суттєво обмеженим. Такі компанії звертаються до сторонніх виробників, щоб отримати малу серію продукції. Це в свою чергу є одним із аспектів актуальності використання технології термоформування, адже більшість наявних виробників малих серій корпусів використовує більш вартісні та трудомісткі технології.

Основні вигоди, що може отримати потенційний користувач товару. Потенційний користувач отримує переваги у вигляді можливості задовольнити свої потреби в малосерійному та одиничному випуску корпусних деталей власного дизайну, при цьому отримуючи високу точність виготовлення та низькі показники витрат на виготовлення оснастки. Запропонована технологія та тип формоутворюючого інструменту є вирішенням проблеми користувача в питаннях випуску продукції об'ємом до 1000 шт.

Зниження рівня витрат досягається за рахунок використання в якості матеріалу інструменту легкооброблюваних матеріалів, зокрема алюмінієвих сплавів, та розігріву заготовки дещо більше температури склування, що знижує енергетичні потреби процесу. Вигода користувача в тому, що є можливість використовувати корпуси власного дизайну без великого збільшення витрат на перевагу використання універсальних пресованих чи литих корпусів. Зведені параметри запропонованої ідеї наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Опис ідеї старап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
1. Технологія вакуумного термоформування	1. Несучі конструкції в приладобудуванні: корпуси, коробки, ящики. 2. Елементи оздоблення: кришки, панелі, кожухи	Забезпечення необхідної точності форми Утворення необхідних функціональних робочих площин; Швидкість процесу формування; Можливість автоматизації; Гнучкість обладнання; Можливість використання багат шарового матеріалу; Різноматісність типів формування, що збільшує діапазон можливих конструкцій
2. Формоутворюючий інструмент		Точність виготовлення інструменту, якість його поверхонь. Ефективне використання ресурсу інструменту за рахунок вибору його матеріалу (дерево, полімери, метал) Менші витрати в порівнянні з прес-формами

4.2. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

Порівняння ведеться за такими техніко-економічними характеристиками як економічні, технічні, надійності, технологічні та експлуатаційні. Дані критерії дозволяються оптимально оцінити ряд недоліків та переваг технологічного процесу та є такими, що висвітлюють найбільш об'єктивне положення в галузі промисловості.

До основних конкурентів можна віднести наступні компанії: Klona, Coloro, «Гамма-Пласт», PlasticPro. Наведені компанії позиціонуються себе як міжнародні та ведуть діяльність в межах Східної Європи та країн СНД. Компанія Гамма-Пласт випускає окрім полімерних виробів лінійку полімерних матеріалів та напівфабрикатів. Акцент компанії ставиться на випуск продукції мільйонними тиражами, тому діапазон наявних технологій зводиться до лиття пластмас під тиском у прес форми.

Компанії Klona та Coloro позиціонуються себе як підприємства, що розробляють і впроваджують технічний дизайн. Тому так чи інакше сфера їх

діяльності зводиться і до малосерійного випуску продукції також. Серед технологій, що пропонують ці компанії – лиття в прес форми, лиття в силіконові форми та 3D друк. Останні дві пропонуються в якості вирішення проблеми малосерійного випуску.

Компанія PlasticPro є виробником пластмасових виробів. Найбільший інтерес компанії середньо- та багатосерійний випуск продукції. Проте останнім часом розвивається напрям 3D друку в якості альтернативи для малосерійного та штучного випуску деталей.

Порівняння з виробниками-конкурентами наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Проект дисертації	Koloro, Klona	Гамма-Пласт	PlasticPro			
1	Економічні	Полімерні несучі конструкції для елетротехнічної галузі				Напівфабрикат в якості заготовки, наявність відходів з листа після формування		Відносно дешевий інструмент, ресурс якого повністю задовольняє умовам малосерійності
2	Технічні					Наявність потоншень матеріалу деталі		
3	Надійності						Можливість контролю процесу витяжки	
4	Технологічні					Формування тільки тонкостінних деталей	Можливість автоматизації	Економічно-ефективний процес формування
5	Експлуатаційні						Полімерні матеріали в основі корпусу; Форма і якість поверхні	

4.3. Технологічний аудит ідеї проекту

Технологічна здійсненність ідеї проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових:

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Технологія виготовлення корпусу є одним з ключових факторів успішності ідеї на ринку. Визначимо основні та найважливіші етапи:

- в якості заготовки використовується напівфабрикат – лист, температури формування нижчі ніж лиття під тиском;
- формоутворення поверхонь рентабельним термоформуючим інструментом;
- можливість автоматизації процесу;
- швидкість процесу формоутворення.

Технологія отримання технічних деталей шляхом термоформування є відомою на сьогодні технологією. Проте не всі гравці ринку застосовують дані технології, так як не вирішено питання раціональної оцінки витяжки матеріалу, що призводить до потоншень, можливість формувати деталі в основному лише з «позитивною» геометрією. Не є очевидним доцільність використання саме такого процесу порівняно з литтям під тиском і теоретично дана технологія не може забезпечити серійний та масовий випуск. І це обумовлено не лише обладнанням, а і ресурсом інструменту з більш дешевих матеріалів.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Термоформування пластикових корпусів	Технологія 1: Формування на ручних станціях власної конструкції	Технологія наявна і достатньо вивчена. Потребує розробки пристосувань.	Повністю доступна
		Технологія 2: Формування на верстатах з ЧПУ	Технологія наявна. Потребує постійного завантаження обладнання через високу його вартість .	Частково доступна у вигляді оренди обладнання
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Технологія 2				

Розглянувши можливі варіанти забезпечення ідеї проекту обрано Технологію 2. Попри низьку поширеність та високу вартість обладнання вирішальним фактором є його гнучкість, забезпечення якості та ідентичності малої серії виробів, можливість автоматизації процесу, що є одним з важливих аспектів при малосерійному виробництві. Сьогодні є ряд виробників такого спеціалізованого обладнання, що повністю задовольняє ідеї проекту та перспективним для подальшого розвитку виробництва. Крім того, на початкових етапах використовується обладнання за допомогою оренди у виді реалізації розроблених проектів на обладнанні виробництва-партнера. В такому разі обладнання не має простоїв, адже підприємство працює з великою кількістю замовників, а автор ідеї даного проекту не несе фінансових ризиків, що стосуються цього обладнання. Це важливий аспект на початкових етапах.

4.4. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Аналіз попиту, його наявність, обсяг, динаміка розвитку ринку. Попиту та динаміку розвитку ринку можна дослідити шляхом аналізу конференцій та виставок, презентацій за останні роки. Користуючись опублікованими звітами можна робити висновок про динаміку росту ринку порівнюючи показники за різні роки. Слід зазначити, що до загального обсягу продажів враховано і показники стандартних універсальних корпусів, проте виключено показники для масового виробництва.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3..5
2	Загальний обсяг продаж, ум.од/рік (Україна, Східна Європа, СНД)	2..3,5 млн у.о.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Вимоги до сертифікатів відповідності в країнах Європи
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарти, що регламентують вимоги до конструкції електро-технічних виробів
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25..40

Таким чином, можна зробити висновок, що на ринку малосерійного виробництва наявні гравці в дуже малій кількості, що пропонують продукцію з високою додатковою вартістю. Це пов'язано з тим, що використовуються більш дорогі технології, які потребують або високих витрат на оснастку або є досить

трудомісткими. Тому вхід на ринок з новою пропозицією є привабливим та очікуваним для потенційним замовників.

Потенційні групи клієнтів, їх характеристики та перелік вимог то товару наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Малосерійне виготовлення продукції	Компанії-виробники спеціалізованої електроніки, апаратури, електротехнічних виробів	Акцент на зменшенні витрат за рахунок зниження економії на проектуванні і виготовленні формуючого інструменту. Тяжіють до зменшення собівартості операції.	- до продукції: порівняно нижча ціна корпусу; можливість впровадження власного дизайну - до компанії-постачальника: можливість забезпечити продукцією об'єм виробництва до 1-2 тис. шт.
2	Випереджальна партія виробництва	Компанії виробники масової продукції	Акцент на високій точності та якості поверхонь, ідентичності випереджальної партії. Партія виробництва обмежується часом проектування і виготовлення основних засобів виготовлення (прес-форми).	- до продукції: ідентичність деталей - до компанії-постачальника: можливість забезпечити корпусами в досить короткі проміжки часу.
3	Дослідна серія виробів	Компанії виробники як малої так і великої серії електротехнічної продукції.	Підприємства, що мають потребу в досить незначному обсязі продукції для внутрішньої оцінки та дослідження перед запуском серійного виробництва.	- до продукції: мінімум затрат, відповідність матеріалів - до компанії-постачальника: можливість досить часто та гнучко вносити зміни та корекції з боку замовника

Аналіз ринкового середовища. Нижче наведено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. №№ 4.5-4.6).

Таблиця 4.5. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Швидкі темпи розвитку технологій швидкого прототипування	Розвиток конкуруючих технологій, що може призвести до масового переходу потенційних замовників до послуг конкурентів	Своєчасне освоєння нових випереджальних технологій, оптимізація власних технологічних процесів, зменшення витрат
2	Залежність від постачальників сировини	Так як знижено долю вартості інструменту, а в якості заготовки використовується більш дорогий напівфабрикат, то вартість поставки заготовок може суттєво вплинути на кінцеву ціну виробу	Довгострокова співпраця з постачальниками, створення взаємовигідних умов співпраці; Розроблення інших видів заготовок методами вторинної переробки сировини.
3	Залежність від виробників обладнання	Незначна кількість виробників обладнання створює залежність від таких виробників не тільки в плані покупки обладнання, а і в плані сервісу	Розвиток власного напрямку обслуговування та вдосконалення обладнання

Таблиця 4.6. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Вдосконалення власної науково-технічної бази	Проведення більш глибоких досліджень та створення на основі них оптимальних методик проектування інструменту	Постійний розвиток технологій
2	Вихід на нові ринки	Збільшення об'єму продажів, співпраця з новими підприємствами та країнами.	Пошук нових ринків збуту та партнерів
3	Впровадження франшиз, філіалів та відділів в різних регіонах	Створення власних центрів сервісу, обслуговування та виготовлення продукції, розвиток об'ємів виробництва	Своєчасне проведення аудиторських та маркетингових досліджень

Загальні риси конкуренції на ринку наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції чиста	На ринку представлені як великі міжнародні компанії, так і порівняно малі підприємства.	Боротьба за вузькоспеціалізовані галузі приладобудування там де великі компанії мають дуже високу ціну.
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Компанії виробники представлені в різних країнах світу. Кожна компанія веде діяльність більш ніж у 4-5 країнах.	Розвиток логістичних і транспортних систем близького зарубіжжя.
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Переважно виробники спеціалізуються на виготовленні інструменту та оснастки. В меншій мірі присутня міжгалузева конкуренція.	Концентрація над конкретними ідеями та видами корпусів (полімерні матеріали).
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Найбільшого значення має призначення товару та його зовнішній вигляд.	Представлення на ринку різних видів корпусів.
5. За характером конкурентних переваг - цінова/не цінова	Конкуренція як за рахунок перспективних технологій так і за рахунок зниження цін.	Забезпечити компромісне рішення
6. За інтенсивністю - марочна	В якості конкурентів розглядаються компанії, що пропонують схожий продукт тим же цільовим споживачам	Приділити увагу маркетинговій компанії для впізнаваності на ринку, виокремлення компанії за рахунок сучасних технологій.

Перелік факторів конкурентоспроможності наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ідея створення корпусів електропристроїв за допомогою термоформування.	Розглянута технологія дозволяє отримати практично ідентичний за формою продукт при цьому запобігти зайвим витратам при виготовленні малої серії
2	Гнучке обладнання	Сучасне обладнання дозволяє швидко налаштовуватись на потреби ринку
3	Формоутворюючий інструмент	Матеріали інструменту та його конструкція дають змогу скоротити час його виготовлення.
4	Відсутність додаткової вартості продукції	Немає додаткової вартості за «бренд»

З огляду на конкурентну ситуацію вихід ідеї на ринок можливий, проте слід розраховувати на ті галузі, де конкуренти мають найменший вплив. До цих галузей слід віднести ті, де потреби в обсязі виробництва складають до 1000шт. в партії.

SWOT-аналіз. Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.9) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.5-4.6).

Таблиця 4.9. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: - позитивне ціноутворення на внутрішньому ринку; - прогресивна технологія виготовлення; - економічно-ефективний технологічний процес;	Слабкі сторони: - відсутність власної сировинної бази; - висока частка імпорту для забезпечення виробництва; - складність виходу на нові ринки;
Можливості: - Вдосконалення власної науково-технічної бази; - Вихід на нові ринки; - Розробка випереджальних технологій на основі наявних	Загрози: - Швидкий розвиток конкуруючих технологій; - Залежність від постачальників сировини та обладнання;

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.10).

Таблиця 4.10. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Забезпечення надійних і незалежних постачальників продукції	Досить велика кількість виробників напівфабрикатів як місцевих так і зарубіжних. Логістичні системи та об'єми продукції розвинуті на високому рівні.	У випадку використання заготовок за стандартами ISO – 0,5..1 місяць. Листи спеціальної товщини 1..1,5 місяці
2	Освоєння власного сервісу та системи удосконалення обладнання.	Обмежується інформацію отриманою від виробника обладнання та досвідом користування.	Для досягнення конкурентної готовності необхідно 0,5..1 рік
3	Освоєння, розвиток та удосконалення прогресивних технологій	Можливо за умов активного розвитку даного напрямку шляхом моніторингу нових досягнень, технологій конкурентів та власних розробок.	1..5 років

В результаті аналізу можна зробити висновок, що велика кількість виробників сировини дає змогу вибирати найбільш вигідні пропозиції. Іншим чином постала ситуація серед виробників обладнання. Тому наведено можливі шляхи вирішення проблем залежності від виробників обладнання. Щоб залишатися в межах конкурентної боротьби також необхідно постійно вести розвиток власних технологій та розробок, впроваджувати нові та прогресивні процеси, скорочувати витрати.

4.5. Розробка ринкової стратегії проекту

Опис цільових груп споживачів. Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Підприємства-виробники продукту в галузі приладобудування (малосерійний випуск приладів)	Зацікавлені	Високий	Не висока, цінова	Доступно
2	Підприємства – масові виробники електротехніки та електроніки	Потенційно можливо	Середній	Висока, не цінова	Складно доступно
3	Підприємства, що мають активні процеси розробки та тестування продукту	Зацікавлені	Середній	Цінова, порівняно низька	Доступно
4	Збиральні підприємства типової продукції	Не зацікавлені	Низький	Цінова, порівняно низька	Недоступно
Які цільові групи обрано: в якості пріоритетної ніші – підприємства-виробники малих серій виробів, в якості потенційно можливих – підприємства зацікавлені і досвідчених та випереджальних партій виробництва.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів прийнято стратегію диференційованого маркетингу.

Стратегія конкурентної поведінки. Стратегія заняття конкурентної ніші є найбільш актуальною, тому що за наведених технологій та конструкції інструменту знижується собівартість несучої конструкції приладу. Це відкриває нові можливості для клієнтів, які раніше не користувались даним різновидом формоутворення (дає змогу застосовувати нові матеріали, оптимізувати технологічні процеси, знизити витрати тощо). Такі ніші є не освоєними конкурентами і цей факт дозволяє зарекомендувати себе на ринку.

Результат аналізу наведено в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки</i>
1	Проект пропонує один із способів вирішення відомих проблем, дуже близький до вже відомих.	Пошук і розвиток клієнтської бази є одним з основних аспектів розвитку компанії.	Спільні характеристики товару продиктовані чинними стандартами та нормами підприємств.	заняття конкурентної ніші

4.6. Розроблення маркетингової стратегії проекту

Маркетингова концепція товару. Формування маркетингової концепції товару наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Зниження частки ціни інструменту у вартості кінцевого виробу	Ефективніший інструмент за порівняно низькою ціною	<ul style="list-style-type: none"> - Відсутність додаткової вартості товару; - Низькі логістичні витрати - Можливість персонального підходу до клієнта в межах малосерійного виробництва
2	Досягнення точності форми та розташування поверхонь	За рахунок гнучкості процесу забезпечується точне формування заданих поверхонь	<ul style="list-style-type: none"> - Швидкість формування

Визначення цінових меж товару. Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.14.). Аналіз проводиться експертним методом.

Для порівняння за одиницю ціни прийнято вартість корпусу компаній конкурентів – 15\$ (середня ціна для габаритів корпусу 100x200x50 мм). Порівняння цін проводиться в контексті малосерійного виробництва. Корпус отриманий в результаті виконання проекту має собівартість виготовлення 8,5\$, при кінцевій вартості продукту – 250\$.

Таблиця 4.14 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	0,1..4,5	0,8..2,0	високий	0,65..0,95

Межі ціни встановлено таким чином, щоб запропонований товар міг охоплювати як конкурентні галузі, так і частково нові, де використовують товари-замінники.

Висновки. Провівши маркетинговий аналіз можливості застосування технології термоформування для виробництва корпусних деталей можна зробити висновок, що запропонована технологія є достатньо конкурентоспроможною, щоб бути представленою на ринку. Виявлено ряд груп потенційних споживачів, та альтернативних шляхів застосування технології в межах обраної галузі. Досліджено можливі загрози та перспективи подальшого розвитку галузі. В цілому можна сказати, що запропонована технологія формування корпусів може успішно зайняти долю ринку виробництва корпусних деталей, що стосується об'єму випуску до 1000 шт..

ВИСНОВКИ

В межах даної дисертації було розглянуто ряд відомих та представлених на ринку методів виготовлення корпусів з полімерних матеріалів. Проаналізовано їх економічну ефективність та продуктивність для заданих об'ємів випуску продукції – до 1000 шт.. На противагу представленим на ринку методам було представлено нову прогресивну технологію вакуумного термформування. Дана технологія дозволяє суттєво знизити витрати на проектування та виготовлення оснастки, що є досить суттєвим фактором малосерійного виробництва.

В ході виконання дисертаційної роботи було виконано такі задачі:

1. Проаналізовано методи виготовлення деталей з полімерних матеріалів та їх ефект від застосування в галузі малосерійного виробництва електротехніки.
2. Обрано та обгрунтовано технологію виготовлення деталі корпусу шляхом термоформування, досліджено особливості процесу вакуумного термоформування.
3. Вирішено проблему контролю нерівномірного розподілу товщини стінки корпусу шляхом моделювання процесу витяжки матеріалу при термоформуванні.
4. Проаналізовано особливості та вимоги до формоутворюючого інструменту при вакуумному термоформуванні.
5. Розроблено технологічний процес виготовлення корпусної деталі з АБС пластику та виготовлено тестовий зразок несучої конструкції корпусу.
6. Порівняно результати моделювання розподілу товщини стінки з фізичною моделлю шляхом вимірів дослідного зразка.
7. Розроблено ряд рекомендацій щодо використання результатів моделювання при проектуванні виробу.

Конструкцію майбутнього корпусу було досліджено на механічну жорсткість, визначено допустимі прогини при лінійних навантаженнях корпусу та відповідну мінімально-допустиму товщину стінки корпусу. Аналіз виконувався сучасними методами статичного аналізу за допомогою методу кінцевих елементів.

Детально дослідивши процес формоутворення шляхом вакуумного термоформування було виявлено ряд проблем, що впливають на якість поверхні, міцність та жорсткість. Зокрема причина виникнення проблем криється у нерівномірному розподілі товщини стінки. В процесі виконання проекту характер потоншення стінки відносно початкової товщини листа було досліджено сучасними методами аналізу кінцевих елементів. Застосування прогресивних методів аналізу дозволило симулювати процес термоформування несучої конструкції корпусу. В результаті було отримано контури розподілення товщини при витяжці матеріалу. Дані дослідження були використанні для корекції конструкції деталі та, відповідно, інструменту з метою досягнення відповідності поставленим умов міцності та жорсткості. Окрім того, маючи в результаті моделювання товщину стінок стало можливим використовувати геометрію внутрішньої поверхні корпусу, форма якої залежить від витяжки. Це дозволяє

враховувати особливості товщини стінки несучої конструкції при проектуванні інших конструктивних елементів, що контактують або розміщуються поряд з внутрішньою поверхнею корпусу. Отже, в результаті дослідження стало можливим передбачити не тільки майбутню жорсткість деталі, а і спроектувати деталі збиральних одиниць із відповідними допусками, що враховують товщину стінки корпусу в місці їх кріплення. Таким чином забезпечення якості деталі корпусу та продукту в цілому можливо досягти ще на етапі його розробки.

При дослідженні процесу витяжки було звернуто увагу на особливості матеріалу та його стану, геометрії та форми корпусу, змінних параметрів процесу формоутворення. При симуляції витяжки деталі корпусу було виявлено критичні місця потоншень та запропоновані методи впливу на зміну товщини. Ці методи було зведено до 3 основних напрямків: заміна матеріалу, корекція параметрів процесу формування, корекція конструкції інструменту. Як було виявлено, найбільший діапазон впливу має саме конструкція інструменту.

Для деталі корпусу «Main Block» було розроблено конструкцію з відповідними корекціями радіусів спряження (збільшено), наявністю кутів уклону стінок для зйому деталі з форми. На основі змодельованого процесу було обрано таку товщину листа АБС пластику, що забезпечує вимоги міжнародних стандартів до жорсткості в кінцевому виробі.

Вирішивши ряд задач, що стосувався технології вакуумного термоформування було виготовлено дослідний зразок та проведено порівняння результатів вимірів товщини стінки з результатами моделювання. Було отримано ідентичний характер розподілення товщини стінки з похибкою в 10%. Це пояснюється тим, що при моделюванні було спростовано ряд теплових явищ, а також не враховано прогини листа при нагріванні під дією своєї маси. В цілому можна сказати, що моделювання МКЕ процесу витяжки дає найбільш точні та близькі результати розподілення товщини стінки. Таким чином рекомендовано використовувати моделювання процесів витяжки в подальших розробках деталей.

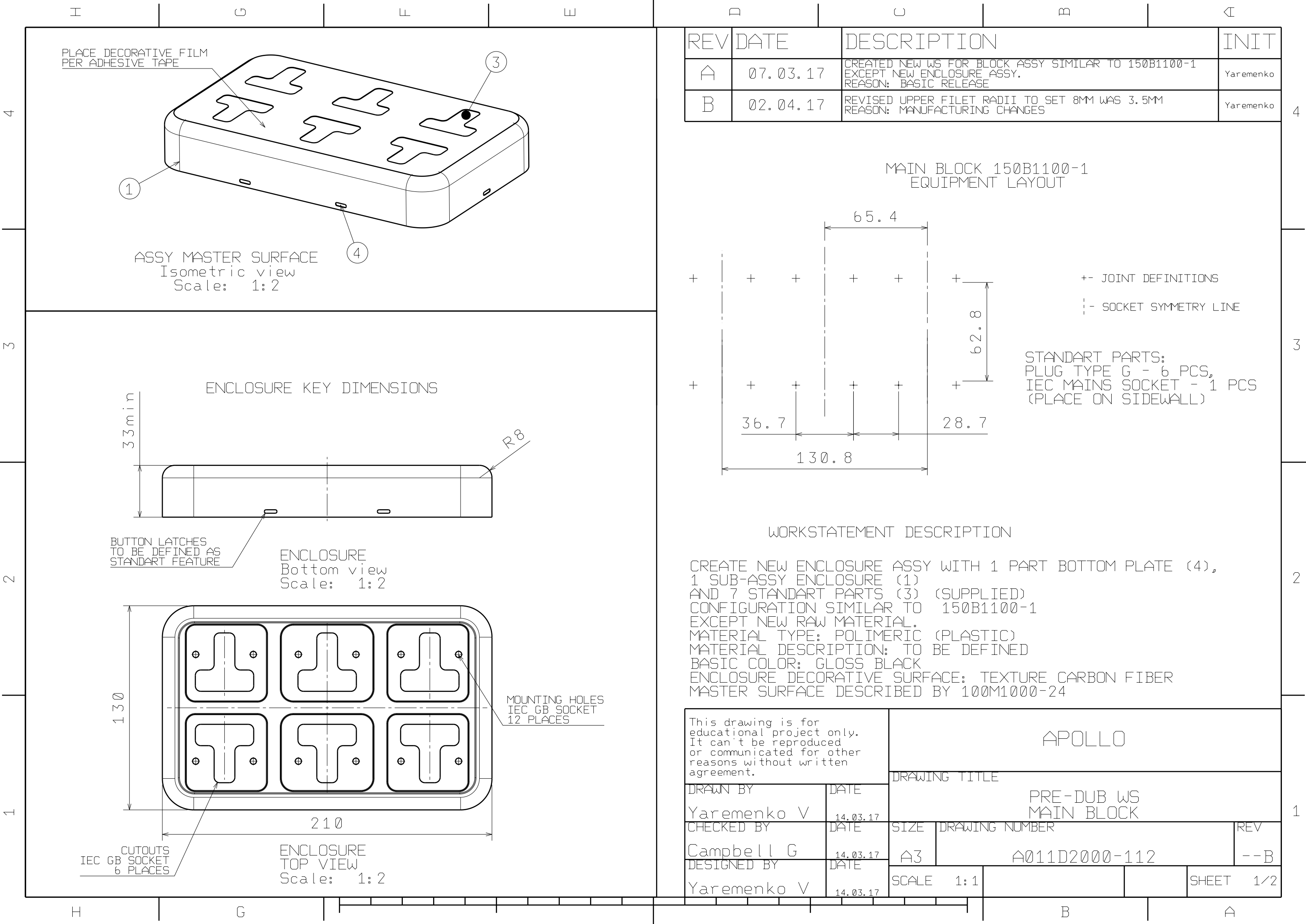
При маркетинговому аналізі було виявлено, що є ряд виробників малосерійної полімерної продукції корпусного типу, проте вони використовують більш витратні технології або здатні виробляти менш якісні деталі.

Також було визначено ряд потенційних споживачів та зведено їх до трьох основних груп: виробники малосерійної електротехнічної продукції, виробники масової продукції, що потребують випереджальної партії деталей на період проектування та виготовлення основної оснастки, а також виробники електротехніки, що потребують невеликої кількості деталей (до 100 шт.) для оцінки та тестування майбутньої конструкції.

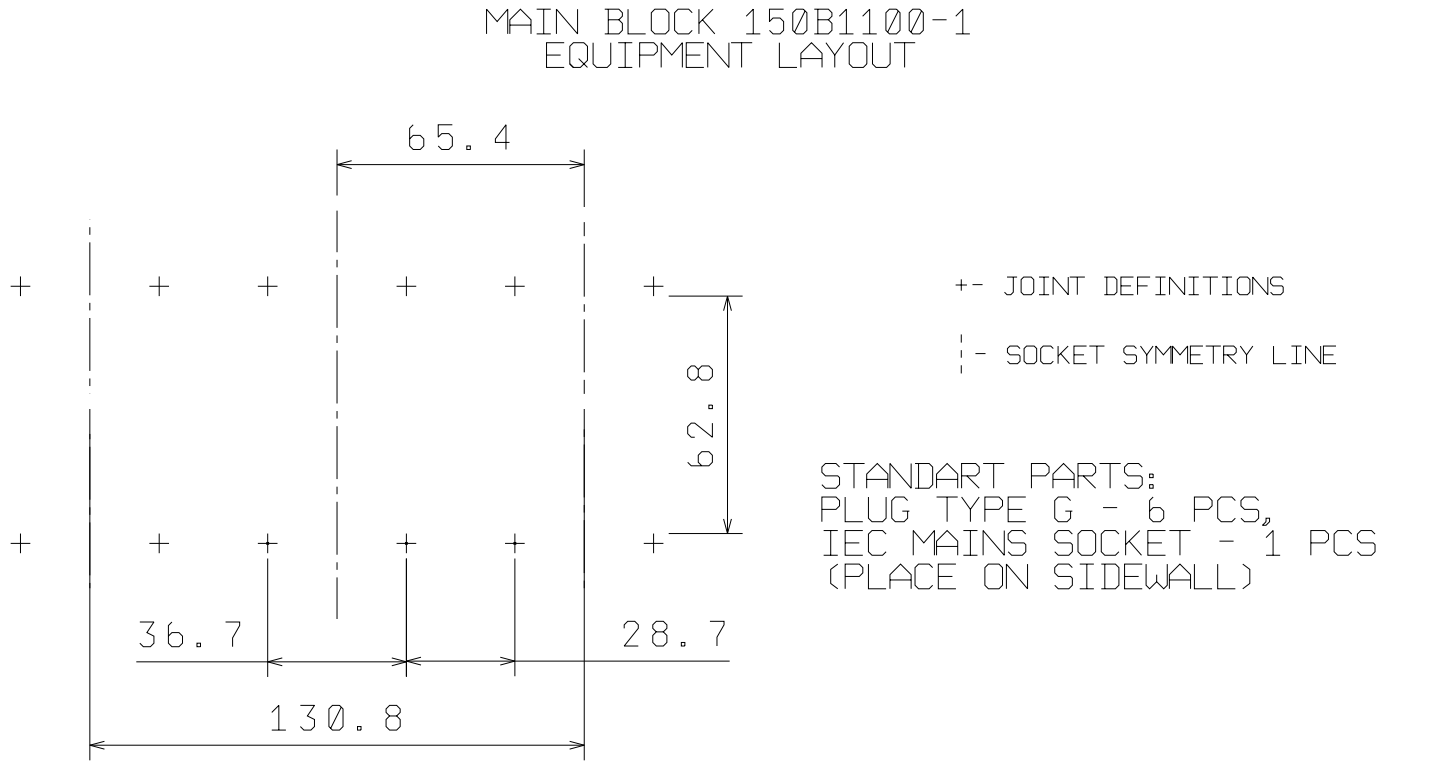
Отже, з точки зору ринку, є досить значні ніші використання запропонованої технології, а позиція конкурентів у них не є сталою. Тому при використанні сучасних методів проектування та аналізу, процесів виготовлення та постійному удосконаленні існуючих методик вихід проекту на ринок на постійній основі є обґрунтованим та успішним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Advanced Thermoforming Solutions [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rayplastics.com/>
2. Carlin C. European Thermoforming Division / Carlin C. // SPE Thermoforming Quarterly® - 2014 - SECOND QUARTER 2014 - VOLUME 33 - NUMBER 2. – Режим доступу: <http://thermoformingdivision.com/wp-content/uploads/TQMagazine2Q2014.pdf>
3. HILL, R. The Mathematical Theory of Plasticity. / HILL, R., Clarendon Press - Oxford classic texts in the physical sciences, 1998. - 355с.
4. KOZIEY, B., GHAFUR, M., VLACHOPOULOS, J., AND MIRZA, F., Computer simulation of thermoforming. In Composite Sheet Forming/ D. Bhattacharyya, Ed., vol. 11 of Composite Materials Series. Elsevier, ch. 3, 75 – 89 с.
5. Mauro Fae, Self Group, Udinese, Italy, in collaboration with Roger C. Kipp A Holistic Approach to Sheet Fed Tooling Development Naitove, M., Plastics Technology, March 2, 2009
6. Purushottam D. Guirati, Arkadii I. Leonov, Modeling And Simulation in Polymers, WILEY-VCH, Federal Republic of Germany, 2010 - 540 с.
7. Schut, J., Plastics Technology, June 1, 1992
8. Society of Plastic Engineers & Plastics Engineering, In seach of eexcellence, Antec, Monreal, 1991, - 2656 с
9. Sven Engelmann, Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation, - U.S. "Wiley", 2012. - 329 с.
10. Whiteford, C., “Method of Forming Container” U.S. Patent 3,184,524
11. Xometry: Manufacturing Demand [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <http://www.xometry.com/>
12. Басов Н.И. Расчет и конструирование формующего инструмента / Басов Н.И., Брагинский В.А., Казаков Ю.В. - М. "Химия", 1991. - 352 с.
13. Иллинг. А Термоформование: практическое руководство/ Иллинг А, Шварцман П. - С. "Профессия", 2006. - 288 с.
14. Калинин Э.Л. Свойства и переработка термопластов. - Л. "Химия", 1983. - 145 с.
15. Комаров В.Г. Способы соединения деталей из пластических масс. - М. "Химия", 1979. - 144 с.
16. Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д. Производство изделий из полимерных материалов, Профессия, Санкт-Петербург, 2004, - 464 с.
17. Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств : учебное пособие / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. –Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 84 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0845-9



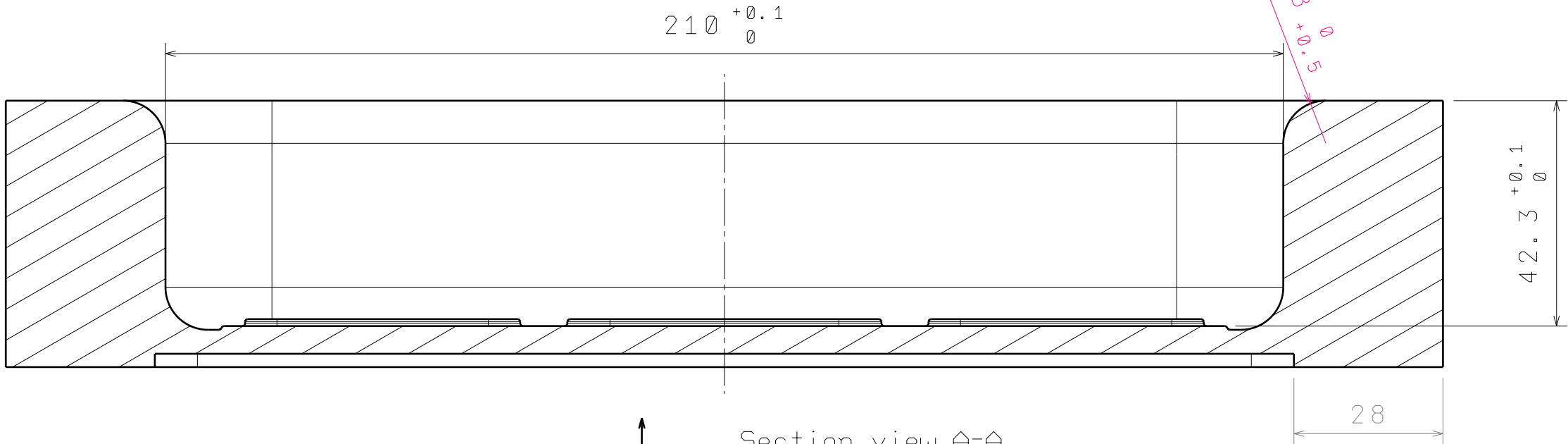
REV	DATE	DESCRIPTION	INIT
A	07.03.17	CREATED NEW WS FOR BLOCK ASSY SIMILAR TO 150B1100-1 EXCEPT NEW ENCLOSURE ASSY. REASON: BASIC RELEASE	Yaremenko
B	02.04.17	REVISED UPPER FILET RADII TO SET 8MM WAS 3.5MM REASON: MANUFACTURING CHANGES	Yaremenko



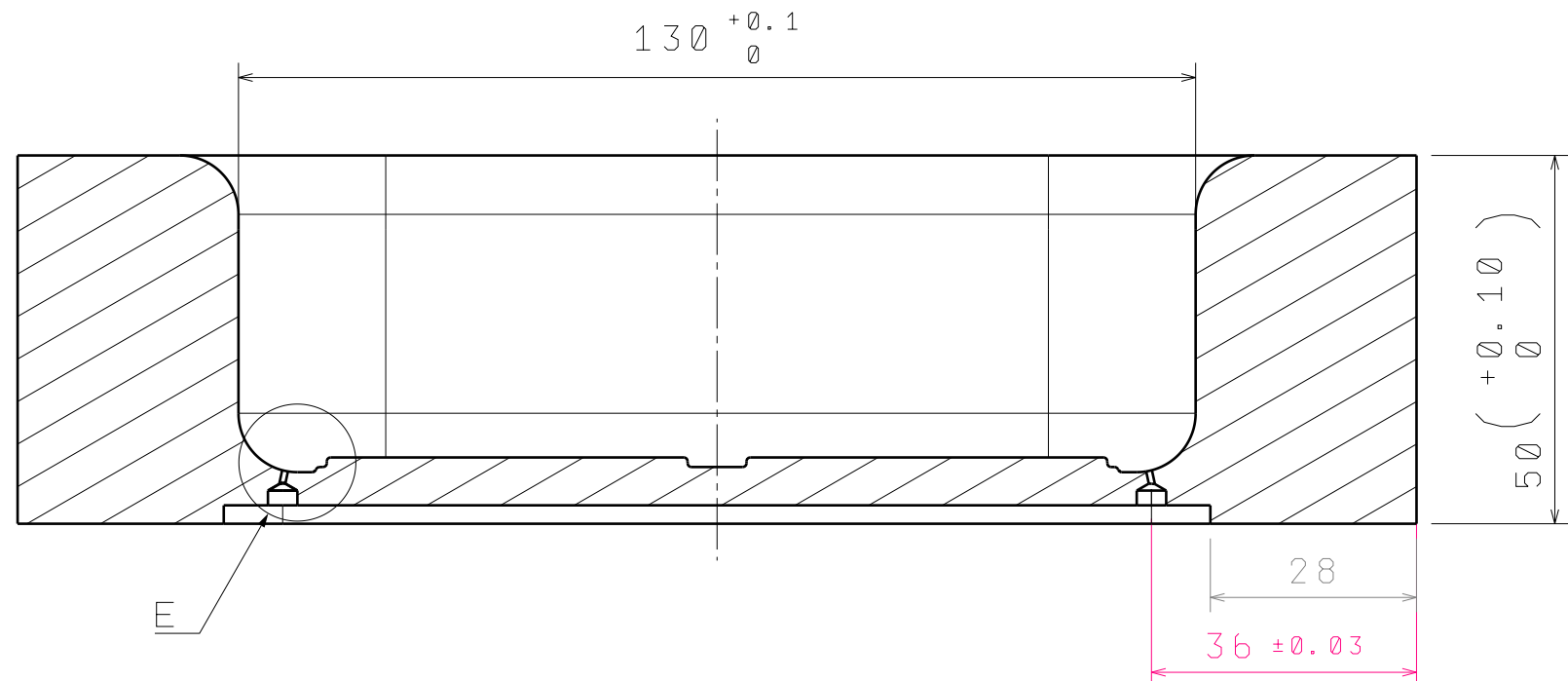
WORKSTATEMENT DESCRIPTION

CREATE NEW ENCLOSURE ASSY WITH 1 PART BOTTOM PLATE (4), 1 SUB-ASSY ENCLOSURE (1) AND 7 STANDART PARTS (3) (SUPPLIED) CONFIGURATION SIMILAR TO 150B1100-1 EXCEPT NEW RAW MATERIAL. MATERIAL TYPE: POLIMERIC (PLASTIC) MATERIAL DESCRIPTION: TO BE DEFINED BASIC COLOR: GLOSS BLACK ENCLOSURE DECORATIVE SURFACE: TEXTURE CARBON FIBER MASTER SURFACE DESCRIBED BY 100M1000-24

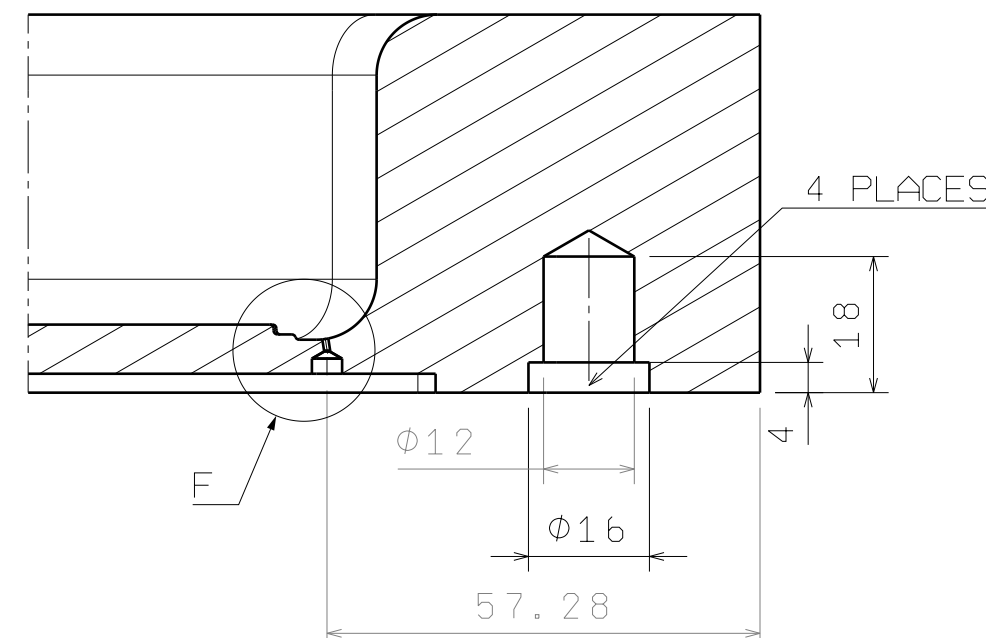
This drawing is for educational project only. It can't be reproduced or communicated for other reasons without written agreement.		APOLLO		
		DRAWING TITLE		
DRAWN BY	DATE	PRE-DUB WS MAIN BLOCK		
Yaremenko V	14.03.17	SIZE	DRAWING NUMBER	REV
CHECKED BY	DATE	A3	A011D2000-112	--B
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1	SHEET 1/2
Yaremenko V	14.03.17			



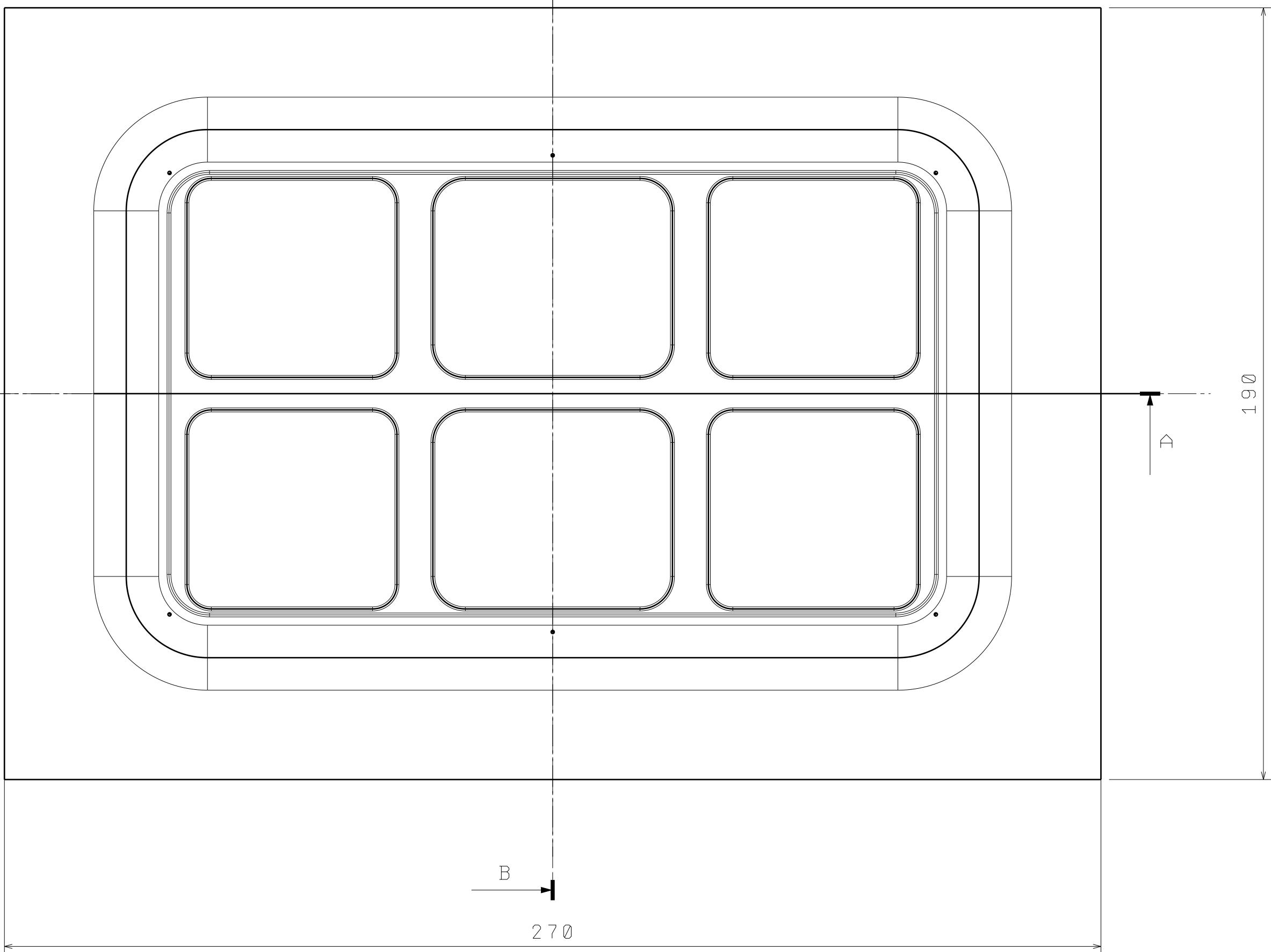
Section view A-A
Scale: 1:1



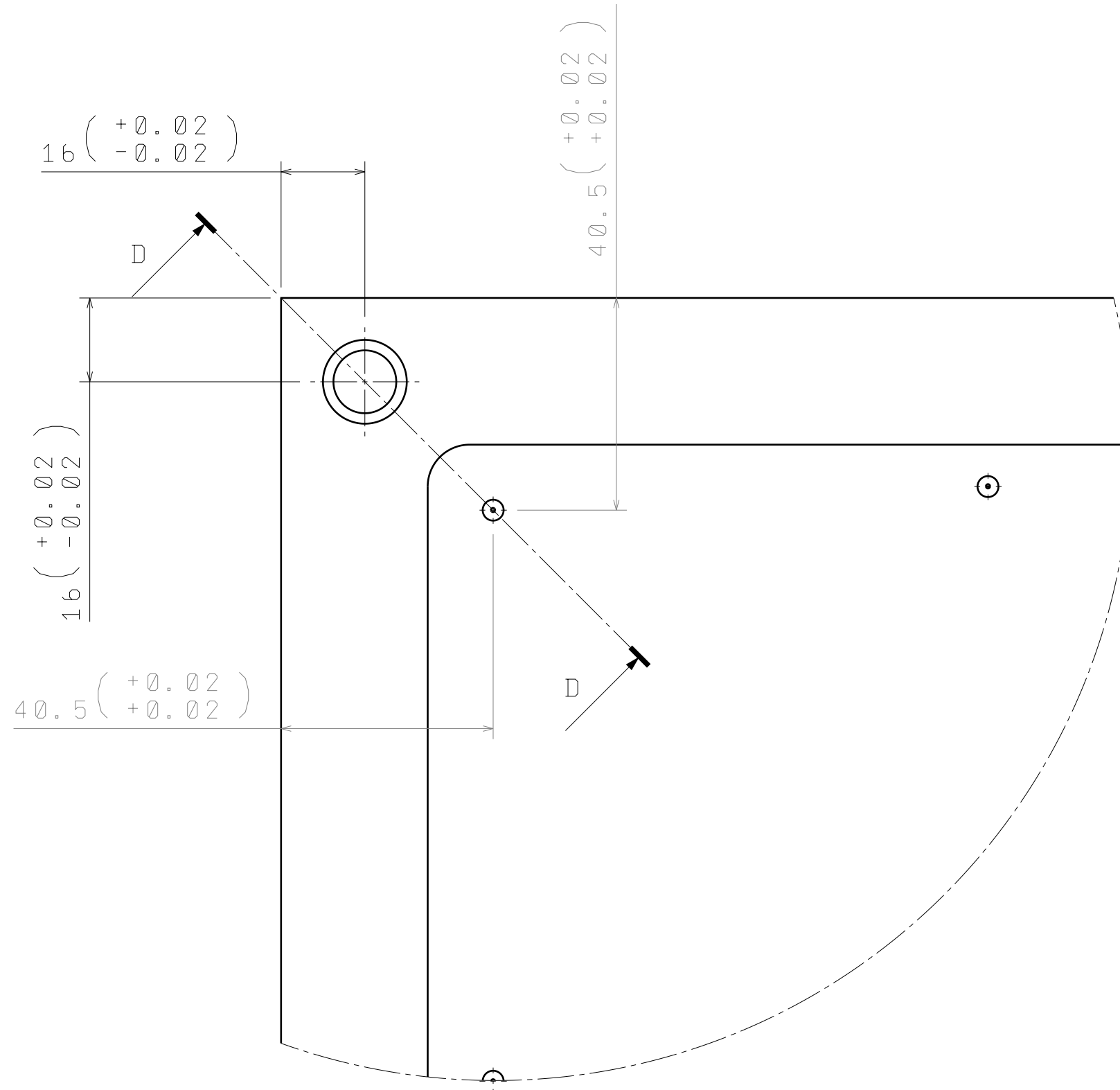
Section view B-B
Scale: 1:1



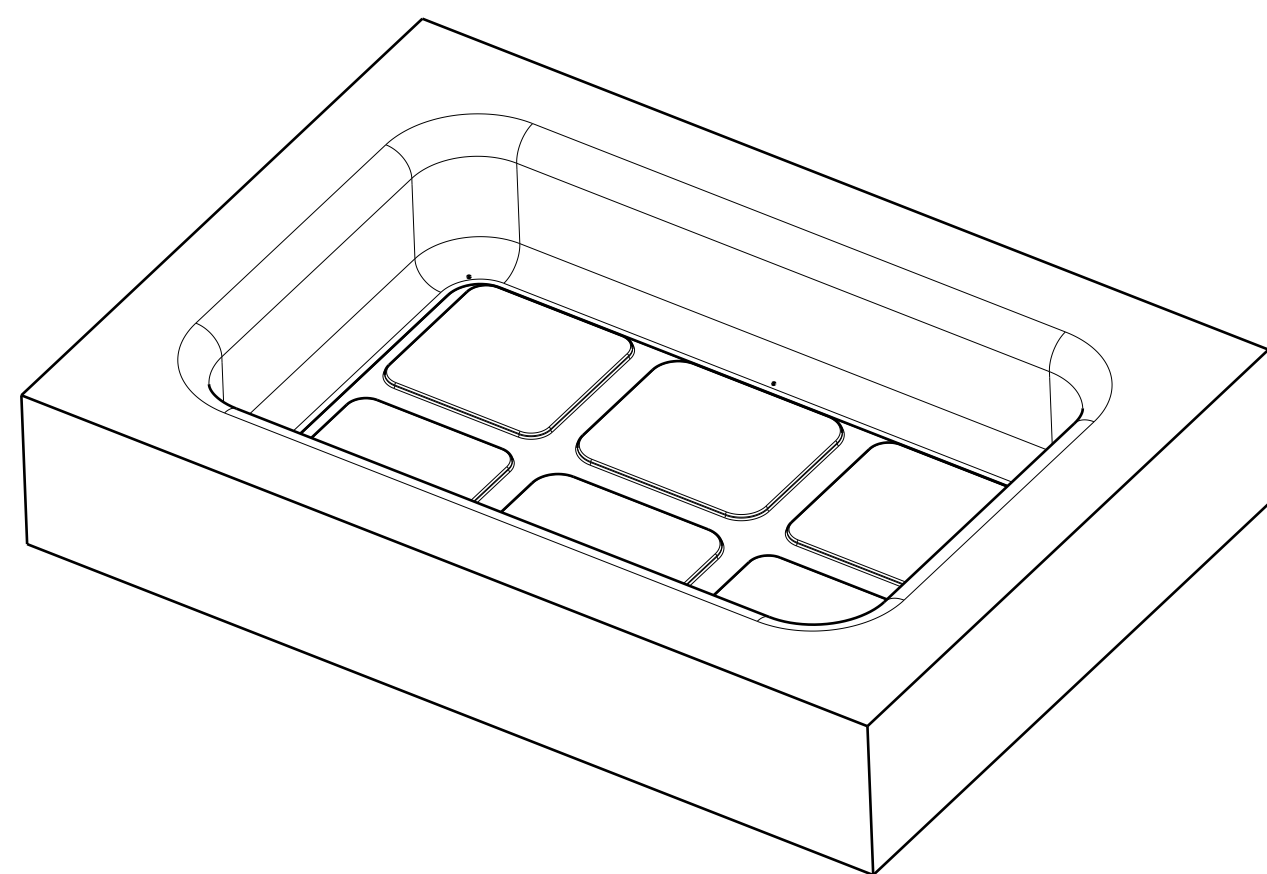
Section view D-D
Scale: 1:1



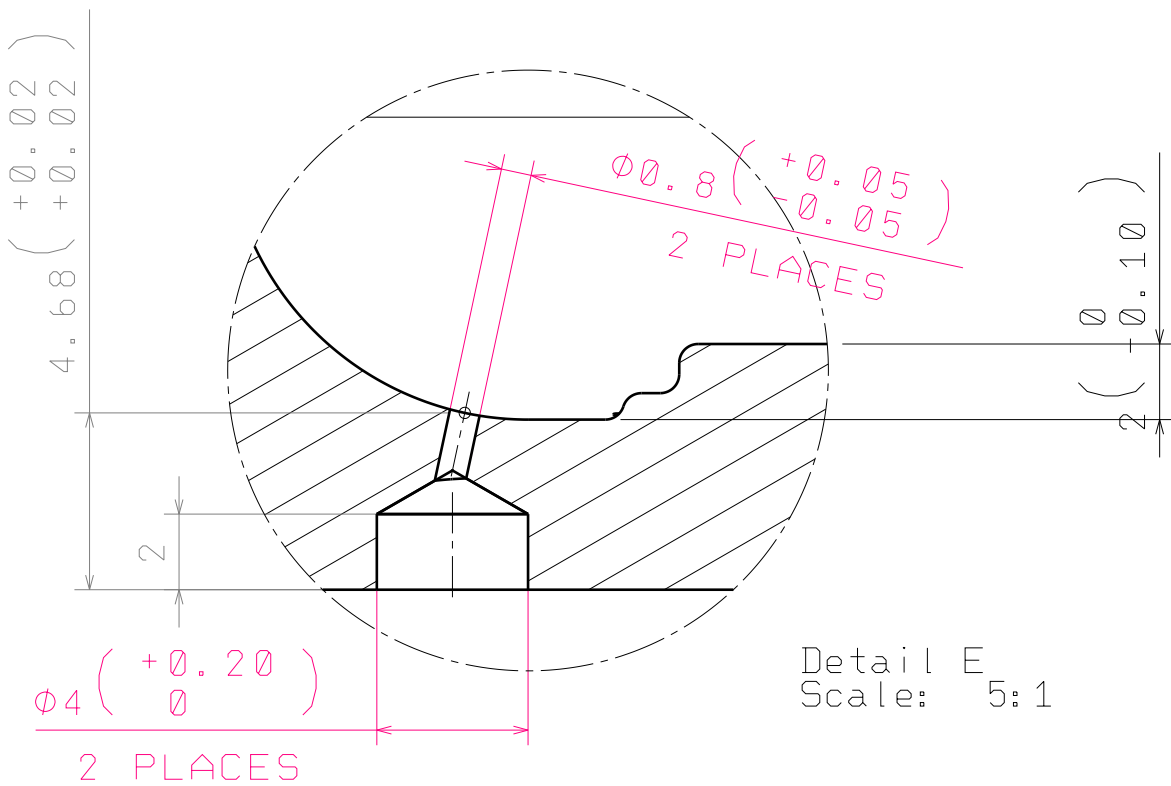
Front view
Scale: 1:1



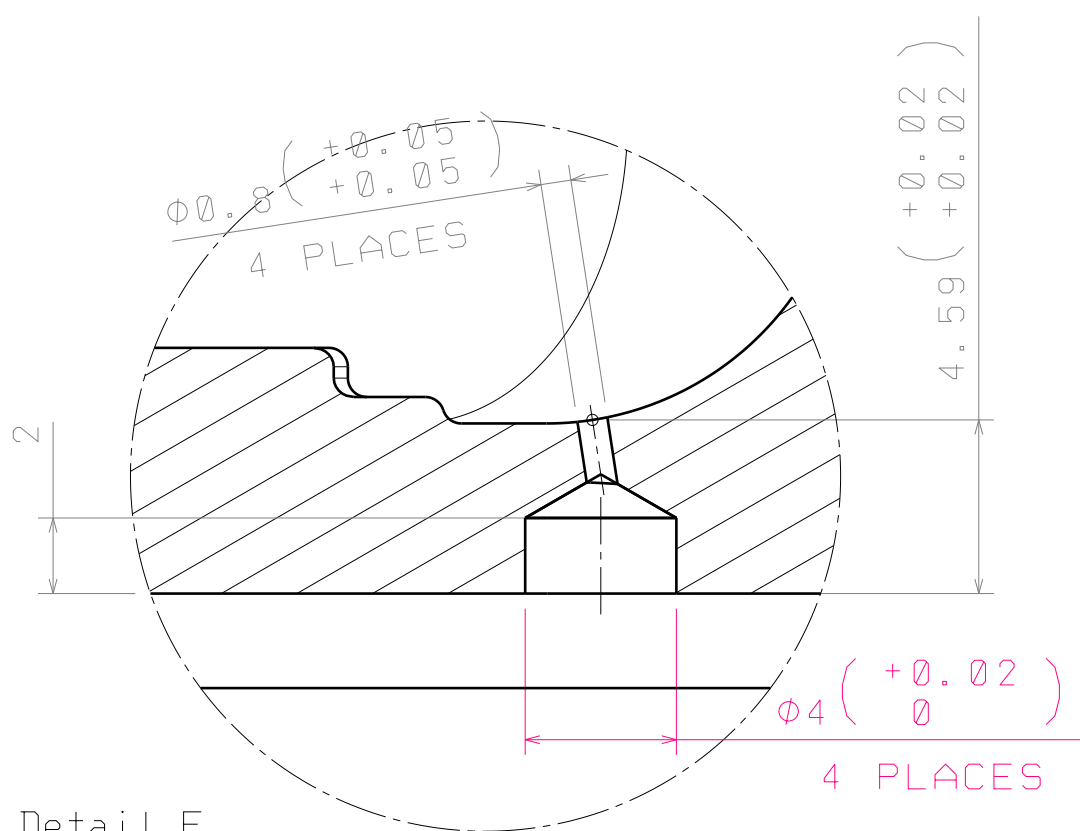
Auxiliary view C
Scale: 1:1



Isometric view REF



Detail E
Scale: 5:1



Detail F
Scale: 5:1

PROVIDED DRAWING IS FOR REFERENCE ONLY.
ENGINEERING AND MANUFACTURING PART DEFINITION ARE EXISTS
IN 3D MBD DATASET 100T1100-14.

This drawing is for educational project only. It can't be reproduced or communicated for other reasons without written agreement.		APOLLO			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY	DATE	FORMING TOOL MAINS BLOCK			
Yaremenko V.	05.05.17				
CHECKED BY	DATE	SIZE		DRAWING NUMBER	
Campbell G.	05.05.17	A1		100T1100-14S01	
DESIGNED BY	DATE	SCALE		SHEET	
Yaremenko V.	05.05.17	1:1		1/1	

Яременко В.В., наук. кер. Равська Н. С., проф., д.т.н..

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського, м. Київ, e-mail: itm@kpi.ua

ФОРМОУТВОРЮЮЧИЙ ІНСТРУМЕНТ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСІВ З ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

На сьогоднішній день вироби з пластмас все активніше витісняють альтернативні матеріали для виготовлення ємностей, корпусів та комплектуючих для виробництв будь-якого напрямку. Це, в першу чергу, пов'язано з універсальністю полімерних матеріалів. На відміну від металів пластик стійкий до 95% речовин наявних в природі та оточуючому середовищі.

Для більшості виробників електроніки підбір необхідного корпусу для нового приладу є серйозною проблемою. В більшості випадків виробники намагаються знайти максимально зручний стандартний корпус, а потім, відштовхуючись від нього, шукають необхідні технології та компоновки приладу. Між тим, коли величина серії виробу наближається до 1000 шт. в рік, варто звернути увагу на створення конкретних прес-форм для нового корпусу. Переваги корпусу власної конструкції очевидні, а його основні недоліки – вартість оснастки і час її виготовлення. Повний цикл створення корпусу від початку розробки до серійного виробу складає від 2 до 6 місяців, а його вартість для більшості приладів знаходиться в діапазоні від 5 до 25 тис. дол. США. При цьому подальша вартість виготовлення складає 0,1 – 0,2 дол. США за корпус.

Проте в даному випадку розглядається наступна ситуація: ряд виробників електротехнічної продукції зацікавлені у виготовленні одиничних або малих серій виробів. Це обумовлено специфікою галузі (наприклад, професійна високоякісна аудіо- та електротехніка) та умовами ринку. Замовники даного виду приладів зацікавлені у конкретному наповненні приладу з точку зору його компоновки та функцій, а також вимог до дизайну та сертифікаційних умов.

Тобто область дослідження можна охарактеризувати наступним чином:

- Виробництво продукції, обсяг випуску якої за весь життєвий цикл не перевищує 1000 штук. Зазвичай це об'єкти спеціального приладобудування, тривалість випуску яких визначається конкурентною боротьбою, а обсяги випуску - заздалегідь відомим числом споживачів.
- Виробництво випереджальних партій продукції паралельно з процесом підготовки масового виробництва і основного інструментального оснащення. Це характерно для комплексних виробів загального приладобудування, де тривалість виходу нового виробу на ринок значна, а фактор лідерства на ринку по виходу оновленої продукції має критичне значення.

- Виробництво малих серій і дослідних партій високотехнологічних і/або наукоємких об'єктів з метою проведення маркетингових досліджень або попереднього тестування. Зазвичай це об'єкти масового виробництва, де конкуренція на рівні функціональних властивостей досягла своєї межі. У даній ситуації на перше місце в боротьбі за переваги споживача виходять ергономіка і дизайн, зовнішній вигляд і упаковка. За допомогою попереднього тестування знижується комерційний ризик.
- Виробництво дослідних партій продукції для попередніх, оціночних та інших видів випробувань. Метою є отримання деталей, що визначають споживчі якості всього виробу. Для вирішення даного завдання використання матеріалів-замінників неприпустимо.

З точки зору формоутворюючого інструменту та технології виготовлення корпусної деталі електроприладу було звернуто увагу на типові технології роботи з полімерними матеріалами. Найбільш ефективним рішенням з точки зору можливої конструкції та економічності було прийнято процес термоформування пластику.

Термоформування, технологія гарячого вакуумного формування - це виробництво виробів з термопластичних матеріалів в гарячому вигляді методом впливу вакууму або низького тиску повітря.

Обравши технологію здатну виготовити просторову деталь з листової заготовки слід звернути увагу на декілька важливих аспектів. Перш за все – тонкостінна деталь не має потовщень та відливів для монтажу кріплення, надання жорсткості конструкції. Тому типову конструкцію корпусу необхідно переглянути та адаптувати для нового процесу. Крім того процес чутливий до температурних режимів, що в високій мірі впливають на якість виробу; має вимоги щодо радіусів спряжень поверхонь та площі формування. Так як площа зформованої деталі значно відрізняється від площі заготовки (листа) – з'являються локальні потоншення деталі. Проте слід зазначити, що вище наведений ряд проблем можна успішно вирішити, ще на етапі розробки виробу та оснастки, застосовуючи сучасні можливості САПР та моделювання поведінки матеріалу при заданих умовах.

Список використаних джерел:

1. Басов Н.И. Расчет и конструирование формующего инструмента / Басов Н.И., Брагинский В.А., Казаков Ю.В. - М. "Химия", 1991. - 352 с.
2. Иллинг. А Термоформование: практическое руководство/ Иллинг А, Шварцман П. - С. "Профессия", 2006. - 288 с.
3. Калинин Э.Л. Свойства и переработка термопластов. - Л. "Химия", 1983. - 145 с.
4. Комаров В.Г. Способы соединения деталей из пластических масс. - М. "Химия", 1979. - 144 с.

УДК 678:67.02

Яременко В.В.

магістрант,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. І.

Сікорського, м. Київ, e-mail: yarcobob@outlook.com

У статті розглядаються особливості різних процесів малосерійного виробництва просторових полімерних деталей; розкрито сутність, мету, особливості зниження витрат при штучному та малосерійному виробництві, визначено найбільш ефективні процеси при заданих умовах; виявлено сфери застосування та найбільшого попиту для даних технологій; представлено порівняльний аналіз різних процесів, які орієнтують виробників на підвищення конкурентоспроможності за рахунок зменшення витрат на виробництво. В якості основного чинника зниження витрат визначається перехід до більш ефективних технологій та удосконалення виробничих процесів. Наведено ряд рекомендацій, щодо розробки конструкції корпусної деталі для процесу вакуумного термоформування, який визначено найбільш ефективним в даних умовах. Також розглядається досвід міжнародних компаній, аналізуються статті професійних видавництв.

Ключові слова: полімерна продукція; малосерійне виробництво; пластмаси; технологія; термоформування.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ПРИ МАЛОСЕРІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПОЛІМЕРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Постановка проблеми. На сьогоднішній день вироби з пластмас все активніше витісняють альтернативні матеріали для виготовлення ємностей, корпусів та комплектуючих для виробництв будь-якого напрямку. Це, в першу чергу, пов'язано з універсальністю полімерних матеріалів. На відміну від металів пластик стійкий до 95% речовин наявних в природі та оточуючому середовищі. Відсутність корозійних та окислових процесів дозволяє

експлуатувати пластикові вироби на протязі довгого періоду часу не втрачаючи при цьому властивостей матеріалу. Так, споживання пластмас в цій галузі стає таким же (в одиницях об'єму) як споживання сталі. Безперервно зростає також застосування лакофарбових матеріалів, синтетичних волокон, клеїв, гуми та інше [3].

З іншої сторони, не дивлячись на очевидні переваги матеріалу, поряд із щорічним зростанням полімерної продукції в одних сферах (зростання об'ємів випуску понад 10% в рік) спостерігається низька активність в застосуванні полімерів, наприклад, виробниками електроніки та електротехніки (загальна доля полімерів в електротехніці складає 8-10% серед усіх галузей). Це пояснюється низькими об'ємами випуску продукції: штучне та малосерійне виробництво, де більшість полімерних технологій є економічно недоцільними.

Таким чином можна сказати, що в певних категоріях виробництва існує стабільний інтерес у впровадженні полімерних матеріалів та технологій їх формування на заміну, наприклад, металів і сплавів [1]. Проте недостатній розвиток та непристосованість традиційних технологій до реальних, особливих умов гальмують цей процес. Тому необхідно впроваджувати економічно ефективні та надійні альтернативи формування полімерних виробів, тим самим розширити сферу їх застосування, удосконалювати існуючі виробничі процеси для усунення втрат часу й ресурсів при малосерійному випуску продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досить невелика кількість досліджень пов'язана з цією темою. Це пов'язано з тим, що малосерійне виробництво пластикових виробів відноситься до технологій, що активно розвиваються.

В даній роботі проводиться аналіз досвіду міжнародних компаній та досліджень. Зокрема розглядаються опубліковані показники компанії Ray Products, Xometry, Titan Audio [1,3]. В них розкриваються витрати на виробництво, що враховують вартість інструменту та процесу виготовлення.

Для аналізу галузей та сфер застосування розглядаються статті видання *Thermoforming Quarterly* [2], де публікується досвід комерційних компаній, останні дослідження в області виробництва полімерних деталей. Так можна виокремити окремі, найбільш поширені процеси: лиття в прес форми під тиском, лиття полімеру в силіконові форми, 3D друк та аддитивні технології. До прогресивних технологій відноситься процес термоформування просторової деталі з листової заготовки під зниженим (або підвищеним) тиском. Деякі компанії вже мають досвід переходу до останньої технології. Проте продукція відноситься до типу лицьових панелей, кришок та ін.. В даній роботі пропонується впровадити процес термоформування для виготовлення власне деталі типу «корпус» за всіма функціональними ознаками.

Мету статті становитиме пошук та аналіз шляхів зниження витрат за рахунок застосування ефективної технології формування корпусних деталей в умовах штучного та малосерійного виробництва і відповідного формоутворюючого інструменту. Аналіз можливості застосування процесів вакуумного термоформування для виготовлення корпусних деталей.

Виклад основного матеріалу. В даному випадку розглядається наступна ситуація: ряд виробників електротехнічної продукції зацікавлені у виготовленні одиничних або малих серій виробів (10-1000 шт. в рік). Це обумовлено специфікою галузі (наприклад, професійна високоякісна аудіо- та електротехніка) та умовами ринку. Замовники даного виду приладів зацікавлені у конкретному наповненні приладу з точку зору його компоновки та функцій, а також вимог до дизайну та сертифікаційних умов.

Тобто область дослідження можна охарактеризувати наступним чином:

- Виробництво продукції, обсяг випуску якої за весь життєвий цикл не перевищує 1000 штук. Зазвичай це об'єкти спеціального приладобудування, тривалість випуску яких визначається конкурентною боротьбою, а обсяги випуску - заздалегідь відомим числом споживачів.

Додаток Г. Технологічні шляхи зменшення витрат при малосерійному виробництві полімерної продукції

- Виробництво випереджальних партій продукції паралельно з процесом підготовки масового виробництва і основного інструментального оснащення. Це характерно для комплексних виробів загального приладобудування, де тривалість виходу нового виробу на ринок значна, а фактор лідерства на ринку по виходу оновленої продукції має критичне значення.

- Виробництво малих серій і дослідних партій високотехнологічних і/або наукоємких об'єктів з метою проведення маркетингових досліджень або попереднього тестування. Зазвичай це об'єкти масового виробництва, де конкуренція на рівні функціональних властивостей досягла своєї межі. У даній ситуації на перше місце в боротьбі за переваги споживача виходять ергономіка і дизайн, зовнішній вигляд і упаковка. За допомогою попереднього тестування знижується комерційний ризик.

- Виробництво дослідних партій продукції для попередніх, оціночних та інших видів випробувань. Метою є отримання деталей, що визначають споживчі якості всього виробу. Для вирішення даного завдання використання матеріалів-замінників неприпустимо.

З точки зору формоутворюючого інструменту та технології виготовлення корпусної деталі електроприладу було звернуто увагу на типові технології роботи з полімерними матеріалами. Найбільш ефективним рішенням з точки зору можливої конструкції та економічності було прийнято процес термоформування пластику.

Дрібносерійне виготовлення пластикових корпусів має на меті створення деталей в малих кількостях. Воно дозволяє запустити партію товару з мінімальними ризиками і витратами.

Для більшості виробників електроніки підбір необхідного корпусу для нового приладу є серйозною проблемою. В більшості випадків виробники

Додаток Г. Технологічні шляхи зменшення витрат при малосерійному виробництві полімерної продукції

намагаються знайти максимально зручний стандартний корпус, а потім, відштовхуючись від нього, шукаючи необхідні технології та компоновки приладу в значній мірі програють в ціні. Найбільш поширена технологія виготовлення корпусів – лиття у прес форми під тиском. Повний цикл створення корпусу від початку розробки до серійного виробу складає від двох до шести місяців, а його вартість для більшості приладів знаходиться в діапазоні від 5 до 25 тис. дол. США і більше залежно від габаритних розмірів виробу. При цьому подальша вартість виготовлення складає 0,1 – 0,2 дол. США за корпус. Це виправдовує себе при об'ємах продукції понад 5000 шт. в рік, а при малих розмірах деталі – понад 1000 шт. в рік [1].

Прес-форми виготовляють з високоякісного металу на основі 3D-моделі. Вони відрізняються високою довговічністю, міцністю і точністю. Прес-форми використовуються у всіх видах промисловості для отримання пластикових, металевих і інших ливарних виробів.

Аналізуючи дослідження Ray Products Company Inc. вартості оснастки та виготовлених деталей розміром 1200x1500 мм методом лиття полімеру під тиском у прес форми (рис. 1) можна зробити висновок про співвідношення економічних складових продукту [1]. Аналізується об'єм випуску 500 – 4500 шт., так як даний сегмент становить найбільший інтерес з точки зору проблем, що розглядаються.

Додаток Г. Технологічні шляхи зменшення витрат при малосерійному
виробництві полімерної продукції

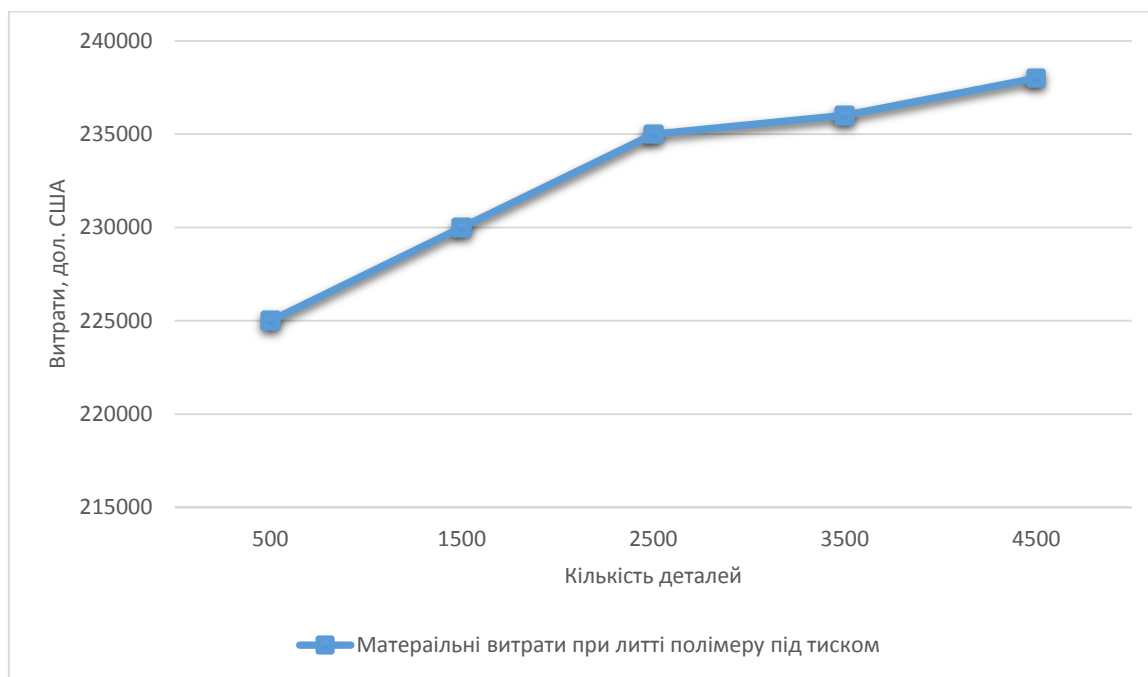


Рисунок 1. Матеріальні витрати при литті полімеру під тиском

Таким чином, вартість деталі з партії 500 шт. становить 452 дол. США, з яких вартість оснастки складає 450 дол. США або 99,5%. В партії 4500 шт. деталей вартість виробу складає 52,9 дол. США, оснастки – 50 дол. США або 94,5%. Враховуючи кількість циклів роботи прес форми можна зробити висновок, що собівартість оснастки при об'ємі в 10 000 шт. деталей і більше буде невпинно знижуватись. Що робить доцільним використання лиття під тиском тільки при великих об'ємах продукції. В сегменті 500-1000 шт. спостерігається висока вартість оснастки, що суттєво впливає на формування кінцевої ціни виробу. З іншої сторони при таких умовах прес форма за період роботи не використовує весь свій ресурс, тому є не ефективним інструментом.

В зв'язку з цим в останній час значно розвивається ринок аддитивних технологій. Це вказує також і на актуальність задач висвітлених у даній роботі.

Швидкий розвиток технологій швидкого прототипування вирішує ряд проблем наведених вище. Особливо, це стосується виготовлення дослідних партій, прототипів.

Сьогодні технологія 3D-друку придбала неймовірну популярність не тільки в світі, але і в Україні. За допомогою 3D-принтера можна порівняно

Додаток Г. Технологічні шляхи зменшення витрат при малосерійному виробництві полімерної продукції

швидко отримати готовий виріб і використовувати його в якості прототипу, для виставки або презентації, в науковій діяльності при моделюванні різних процесів. Роздруковані вироби дозволяють повністю оцінити функціональність майбутнього пластикового корпусу без істотних витрат на запуск багатосерійного виробництва. З цієї точки зору технологія виробництва пластмасових виробів за допомогою 3D-друку є незамінним засобом для оцінки рентабельності продукту. До того ж, на цьому етапі можна легко помітити вади або недоліки функціоналу предмета і переробити 3D-модель.

3D-друк відноситься до штучного виробництва пластикових виробів, так як є ідеальним варіантом виробництва корпусів або деталей в штучному тиражі.

Проаналізуємо досвід компанії Xometry, що стосується малосерійності випуску пластикових виробів шляхом 3D-друку для деталі розмірами 100x40x20 мм [2]. В аналізі приводиться вартість одного виробу залежно від кількості виготовлених деталей (рис. 2). Так як 3D принтер не потребує спеціальної оснастки для кожної деталі – її вартість на графіку не враховується. Для порівняння динаміки зміни вартості додається крива вартості аналогічної деталі, що виготовлена шляхом лиття в прес форму в перерахунку на кількість деталей.

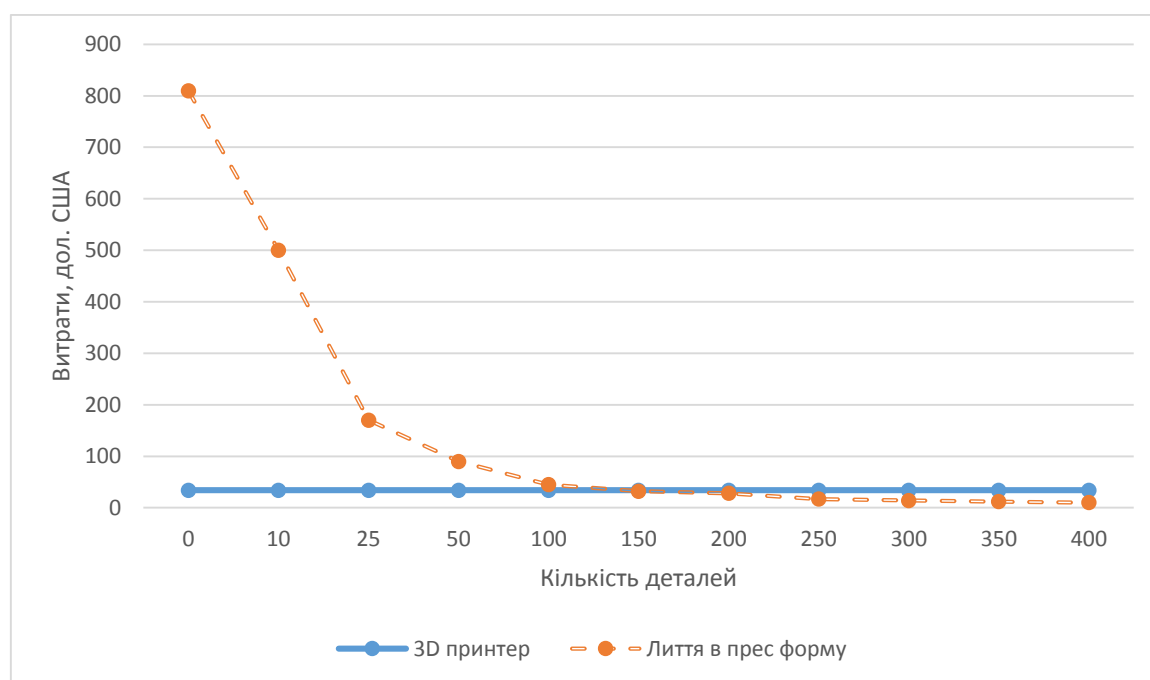


Рисунок 2. Порівняння процесів лиття та аддитивних технологій

Судячи з наведеного графіка, можна відмітити, що у деталі, яка виготовлена шляхом 3D-друку фактично відсутня зміна вартості залежно від кількості деталей. Проте навіть у порівнянні з литвом у прес форми можна сказати, що вартість деталей при невеликому об'ємі (до 1000 шт.) буде високою. Можна зробити висновок, що на сьогодні 3D друк є ефективним інструментом, якщо обсяг продукції не перевищує 100 шт., але висока вартість устаткування та розхідних матеріалів залишаються високими, що обмежує його використання лише для створення прототипів. Слід також звернути увагу на суттєвий фактор часу створення деталі. Адже деталь створюється пошарово і це значно збільшує час процесу при малосерійному випуску.

Тобто коли етап тестування та дослідження продукції завершується і ставиться задача випуску саме продукту в тому чи іншому об'ємі – аддитивні технології не можуть ефективно вирішити ці задачі, так як не несуть суттєвого економічного ефекту в порівнянні з іншими технологіями. Це, безумовно, стимулює подальший розвиток цієї галузі і ці проблеми будуть вирішені в майбутньому. Проте існуючий ряд проблем потребує їх вирішення вже сьогодні.

Інший варіант зниження вартості оснастки при литті полімерів досягається шляхом лиття в силіконові форми. Цей спосіб відноситься до дрібносерійного виробництва і підходить для виготовлення невеликої партії виробів (від 20 до 1000 штук).

В даному випадку, дана технологія здатна забезпечити достатній економічний ефект, проте потребує застосування декількох різних процесів, низький ресурс однієї форми та значний час виготовлення виробу. З огляду на це лиття в силіконові форми не дає змоги ефективно замінити існуючі технології, хоча і має позитивні економічні аспекти.

Серед інших можливих процесів виготовлення корпусу можна виділити термоформування пластику. Аналізуючи експериментальний досвід застосування цієї технології в авіа- та автомобілебудуванні, медичній галузі та пакуванні можна зробити попередній висновок, що дану технологію слід розглянути більш детально.

Термоформування, технологія гарячого вакуумного формування - це виробництво виробів з термопластичних матеріалів в гарячому вигляді методом впливу вакууму (низького тиску повітря).

Вакуумне формування, по суті, є варіантом витяжки, при якій листовий пластик, розташований над або під матрицею (інструментом формування), нагрівається до певної температури, і повторює форму матриці за рахунок створення вакууму між пластиком і матрицею.

Обираючи технологію здатну виготовити просторову деталь з листової заготовки слід звернути увагу на декілька важливих аспектів. Перш за все – тонкостінна деталь не має потовщень та відливів для монтажу кріплення, надання жорсткості конструкції. Тому типову конструкцію корпусу необхідно переглянути та адаптувати для нового процесу. Крім того процес чутливий до температурних режимів, що в високій мірі впливають на якість виробу; має вимоги щодо радіусів спряжень поверхонь та площі формування. Так як площа зформованої деталі значно відрізняється від площі заготовки (листа) – з'являються локальні потоншення деталі. Проте слід зазначити, що вище наведений ряд проблем можна успішно вирішити, ще на етапі розробки виробу та оснастки, застосовуючи сучасні можливості САПР та моделювання поведінки матеріалу при заданих умовах.

Аналізуючи досвід Ray Products Company Inc з виготовлення виробів за допомогою термоформування розміром 1200x1500 мм, можемо порівняти показники з наведеними вище на Рис. 3 [1].

Додаток Г. Технологічні шляхи зменшення витрат при малосерійному виробництві полімерної продукції

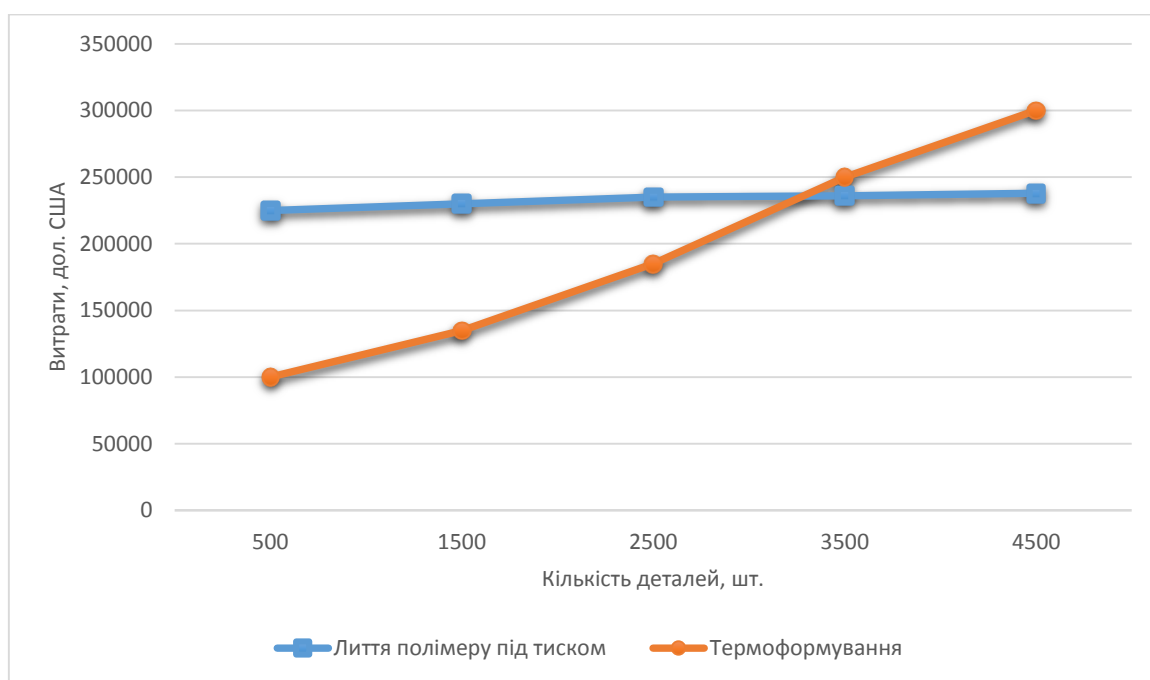


Рисунок 3. Порівняння процесів виготовлення полімерних деталей

Як бачимо, в проміжку, що становить інтерес, процес термоформування має істотно нижні показники вартості ніж лиття в прес форму, особливо витрати на оснастку – більш ніж у 2 рази. Це дозволяє уникнути зайвих матеріальних витрат при початкових партіях продукту. Також варто відмітити, що даний процес не потребує розплаву полімеру, а тільки його розігріву до стану пластичності, має значно менше вимог щодо точності і якості оснастки та матеріалів, що застосовуються. Переважно це алюмінієві сплави, що легко оброблюються і надійно працюють в діапазоні 500-1000 циклів і більше. Крім того для даного процесу доступні всі види термопластів, наявних в технології лиття під тиском.

До особливостей процесу відноситься також те, що тільки одна поверхня листа знаходиться в контакті з формуючим інструментом. Тому тільки одна сторона виробу буде точно повторювати конфігурацію форми. Конфігурація зворотної сторони буде залежати від витяжки матеріалу.

Висновки та пропозиції. Проведений аналіз показав, що існують процеси роботи з полімерними матеріалами, що є більш ефективними ніж поширені

сьогодні серед виробників. Проте необхідно більш детально підійти до нового технологічного забезпечення конструктивних елементів, таких як кріплення, бурти, вирізи, слоти і т.п.. Перші позитивні результати вдалося досягти в рамках тестової зміни технології для деталі корпусу. Тому доцільним є продовження проведення робіт у даному напрямку. За результатами роботи можна зробити такі висновки:

1) Усунення втрат часу й ресурсів при малосерійному випуску продукції можливе за рахунок раціонального вибору технологічних процесів, адаптивного проектування оснастки та конструкції виробу, процес вакуумного термоформування можна назвати прогресивним та перспективним з точки зору малосерійного виробництва та зниження витрат;

2) Удосконалення виробничого процесу вакуумного термоформування можливе за рахунок скорочення підготовчих (підготовка листів, закріплення на верстаті і т.д.) та фінішних етапів (монтаж кріплень, лако-фарбове покриття, вирізка, виймання з форми і т.д.) за рахунок їх автоматизації, аналізу та вдосконалення кріпильних елементів і впровадження їх в процесі власне формування, застосування попередньо пофарбованих листів;

3) Процес вакуумного термоформування є ефективним лише в певному проміжку об'єму випуску продукції. Цей об'єм залежить здебільшого від габаритних розмірів деталі і становить не більше 5000 шт.. Тобто процес можна використовувати при одиничному та малосерійному виробництві.

Список використаних джерел:

1. Advanced Thermoforming Solutions [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rayplastics.com/>

Додаток Г. Технологічні шляхи зменшення витрат при малосерійному
виробництві полімерної продукції

2. Carlin C. European Thermoforming Division / Carlin C. // SPE Thermoforming Quarterly® - 2014 - SECOND QUARTER 2014 - VOLUME 33 - NUMBER 2. –
Режим доступу: <http://thermoformingdivision.com/wp-content/uploads/TQMagazine2Q2014.pdf>
3. Mauro Fae, Self Group, Udinese, Italy, in collaboration with Roger C. Kipp A Holistic Approach to Sheet Fed Tooling Development
4. Naitove, M., Plastics Technology, March 2, 2009
5. Schut, J., Plastics Technology, June 1, 1992
6. Whiteford, C., “Method of Forming Container” U.S. Patent 3,184,524
7. Басов Н.И. Расчет и конструирование формующего инструмента / Басов Н.И., Брагинский В.А., Казаков Ю.В. - М. "Химия", 1991. - 352 с.
8. Иллинг. А Термоформование: практическое руководство/ Иллинг А, Шварцман П. - С. "Профессия", 2006. - 288 с.
9. Калинин Э.Л. Свойства и переработка термопластов. - Л. "Химия", 1983. - 145 с.
10. Комаров В.Г. Способы соединения деталей из пластических масс. - М. "Химия", 1979. - 144 с.

Магістерська дисертація
на тему:

**“ФОРМОУТВОРЮЮЧИЙ
ІНСТРУМЕНТ ТА ТЕХНОЛОГІЯ
ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСІВ ІЗ
ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ”**

Виконав: ст. 6 курсу гр. МІ-61м

Яременко В.В.

Науковий керівник: д.т.н., проф.

Равська Н.С.

Актуальність теми

- Вироби з пластмас все активніше витісняють альтернативні матеріали
- В області виробництва електропристроїв існує зростаючий інтерес у застосуванні полімерних матеріалів на заміну металів і сплавів
- Ряд потенційних споживачів потребує застосування нових та ефективних технологій в умовах малосерійного виробництва
- Процес виробництва буде більш ефективним, якщо отримані з його допомогою вироби будуть більш рентабельні, ніж отримані за іншою технологією

Об'єкт та предмет дослідження

- **Об'єкт дослідження** – процес виготовлення просторової деталі з полімерного матеріалу.
- **Предмет дослідження** – формоутворюючий інструмент та технологія виготовлення корпусу методом вакуумного термоформування листової заготовки.

Мета і задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є досягнення зниження витрат при проектуванні та виробництві корпусів з полімерних матеріалів за рахунок розробки ефективного формоутворюючого інструменту та технології їх виготовлення.

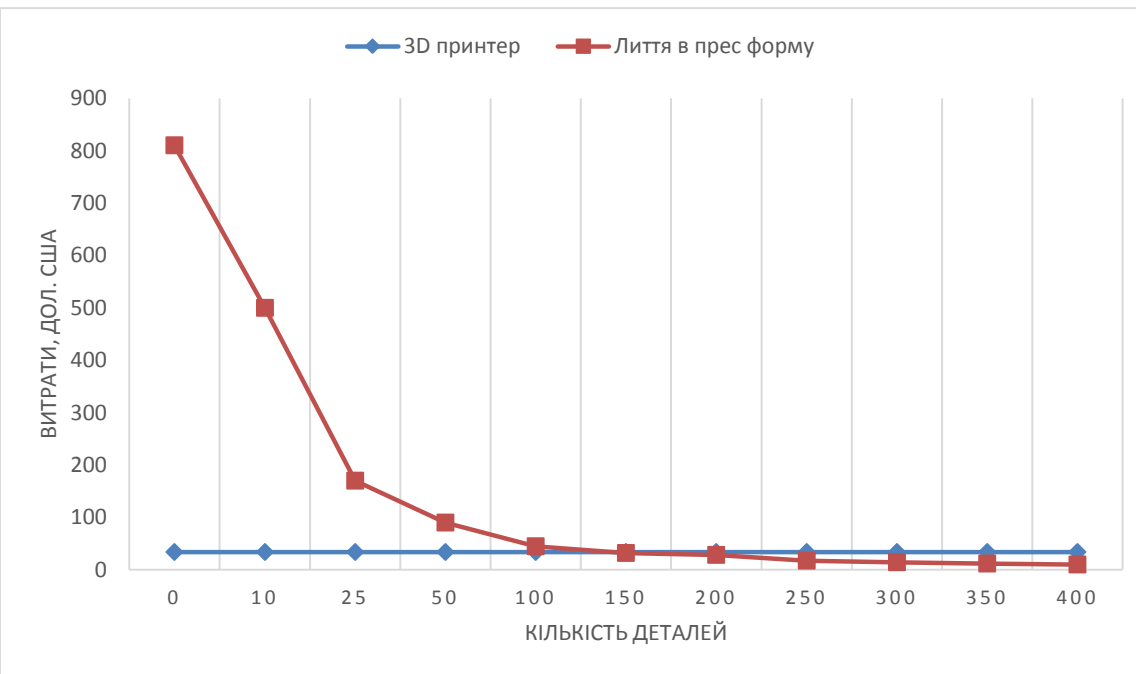
Задачі дослідження:

- Аналіз методів виготовлення деталей з полімерних матеріалів та їх ефект від застосування в даній галузі.
- Вибір та обґрунтування технології виготовлення деталі корпусу, особливості процесів формоутворення.
- Визначення задач і проблем при обраному процесі формоутворення. Дослідження та шляхи їх вирішення.
- Аналіз особливостей та вимог до формоутворюючого інструменту при обраній технології виготовлення.
- Розроблення технологічного процесу для корпусної деталі та виготовлення тестового зразка несучої конструкції корпусу.
- Порівняльний аналіз результатів досліджень та фізичної моделі.
- Пошук шляхів майбутнього удосконалення виробничих процесів та сфер застосування.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

- Дрібносерійне виготовлення пластикових корпусів має на меті створення деталей в малих кількостях (10 - 1000 шт.). Воно дозволяє запустити партію товару з мінімальними ризиками і витратами.
- До корпусів відносять деталі, що несуть в собі систему отворів і поверхонь, координованих один відносно одного. Корпусні деталі необхідні для монтажу і утримання різних механізмів, пристроїв та апаратів

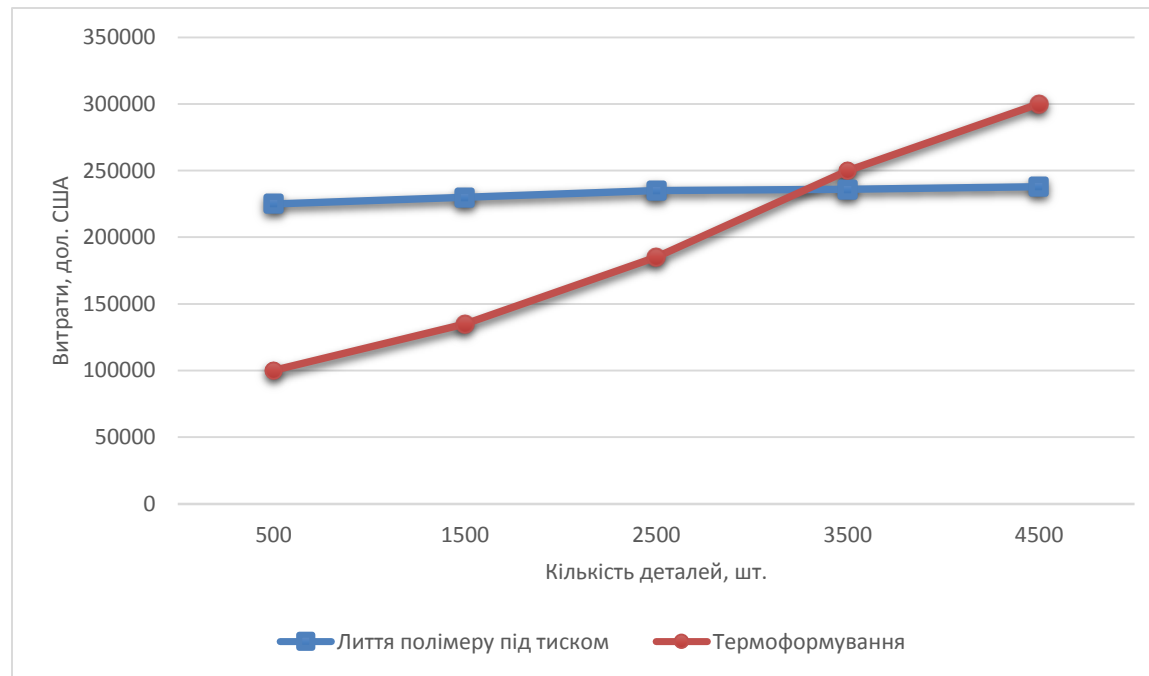
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ



- Деталь, що виготовлена шляхом 3D-друку фактично відсутня зміна вартості залежно від кількості деталей

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

- Процес термоформування має істотно нижні показники вартості ніж лиття в прес форму, особливо витрати на оснастку – більш ніж у 2 рази



АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

- Обмеження доступних технологій відбувається за рахунок планованого мелосерійного об'єму випуску продукції
- Зниження витрат на інструмент є суттєвим фактором вибору технології

Характеристики:		Процес:		
		Лиття в прес форми	3D друк	Термоформування
Інструмент	Вид	Прес форма	Не має ф/у інструменту	Матриця
	Матеріал	Інструментальні та конструкційні сталі	--	Алюмінієві сплави/Деревина
Матеріали	Вид	Гранулят	Стрічка/порошок	Лист
	Вид	Термопласти		
Ефективний об'єм випуску, шт.		>1000 шт	<100 шт	<1000
Відносний час виготовлення оснастки		1	--	0,5
Відносний час виготовлення деталі		1	5	2
Відносні витрати на оснастку		1	--	0,4

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ТЕРМОФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

- Вакуумне формування по суті є варіантом витяжки
- При термоформуванні тільки одна сторона нагрітого матеріалу вступає в контакт з формуючим інструментом
- Проблема зміни величини товщини стінки в процесі витяжки матеріалу

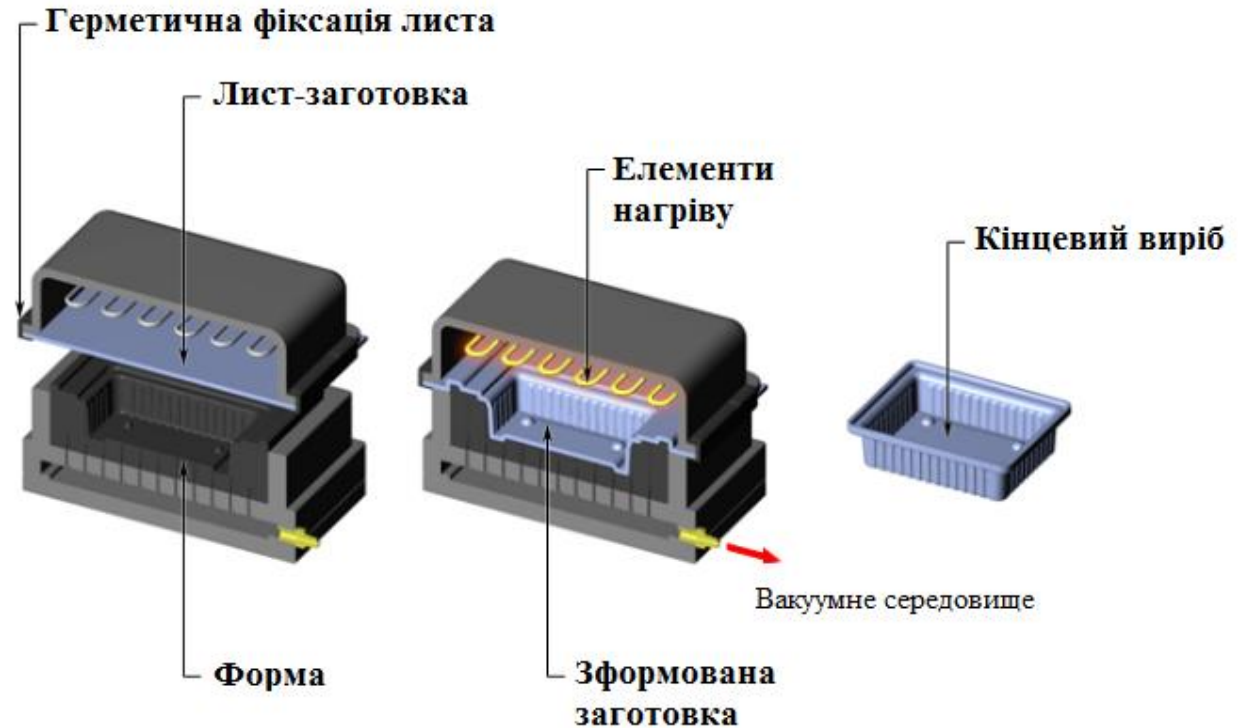


Схема процесу вакуумного термоформування

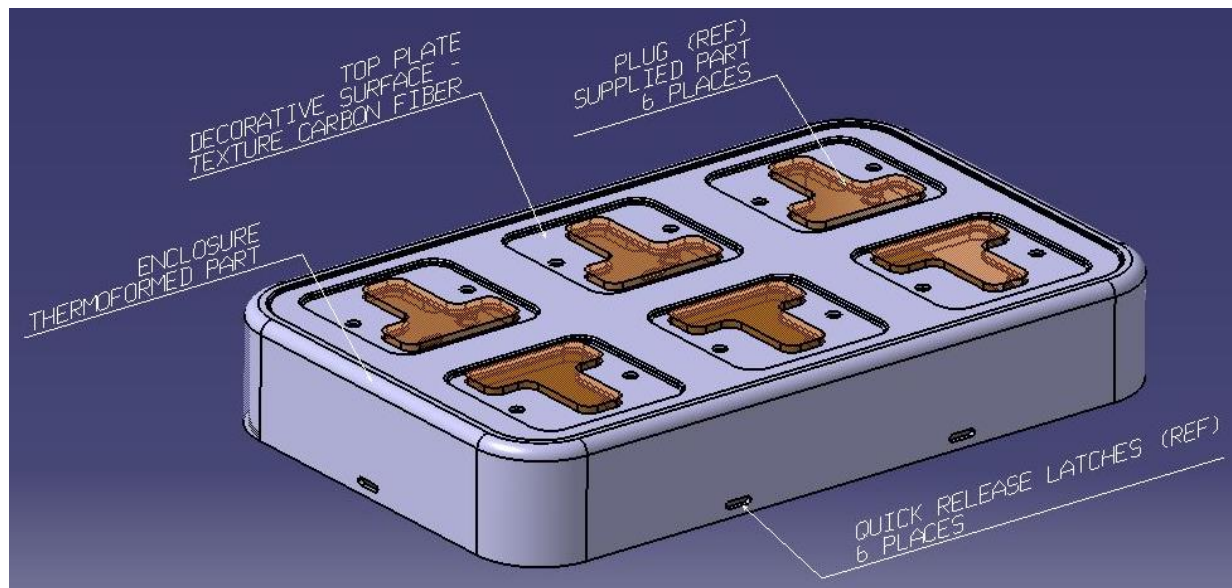
ТЕРМОФОРМОВАННИЙ МАТЕРІАЛ

- Діапазон товщин матеріалів, що формуються складає від 0,05 до 15 мм, для спінених матеріалів до 60 мм.
- АБС (ABS)пластик має добре збалансовані характеристики, практично відсутні надмірні показники температури експлуатації та міцності
- Характерні особливості АБС пластику:
 - висока якість поверхні листа, стійкість до подряпин;
 - широкий діапазон кольорів в стані напівфабрикату (дозволяє скоротити ряд трудомістких фінішних операцій).

Полімерний матеріал	Позначення за ISO	Густина	Міцність на розтяг	Модуль пружності	Коефіцієнт лінійного розширення	Питома теплоємність	Температура тривалої експлуатації	Температура фазового переходу	Температура плавлення кристалітів	Температура формування
<i>Сополімер акрилонітрилу, напівбутадієну і стиролу</i>	ABS	1,02	50	2500	90	1,3	-45 +85	100	-	160-220

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБУ

Корпус матиме дві робочі площини, одна з яких буде закриватися декоративною поверхнею. Нижня кришка кріпиться за рахунок «швидкокомонтованих» замків, що полегшує збирання. Для проектування обрано роз'ємний призматичний корпус



Загальний вид приладу

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНО ДОПУСТИМОЇ ТОВЩИНИ СТІНКИ КОРПУСУ

Для перевірки можливості застосування корпусів, виготовлених методом термоформування, на перевагу корпусам на основі металу, проведено дослідження на відповідність умовам жорсткості та міцності, що регламентуються стандартами

- ISO 14123-2-2001,
- IEC 60335-1-2015.

Враховуючи форму корпусу доцільно провести аналіз методами кінцевих елементів.

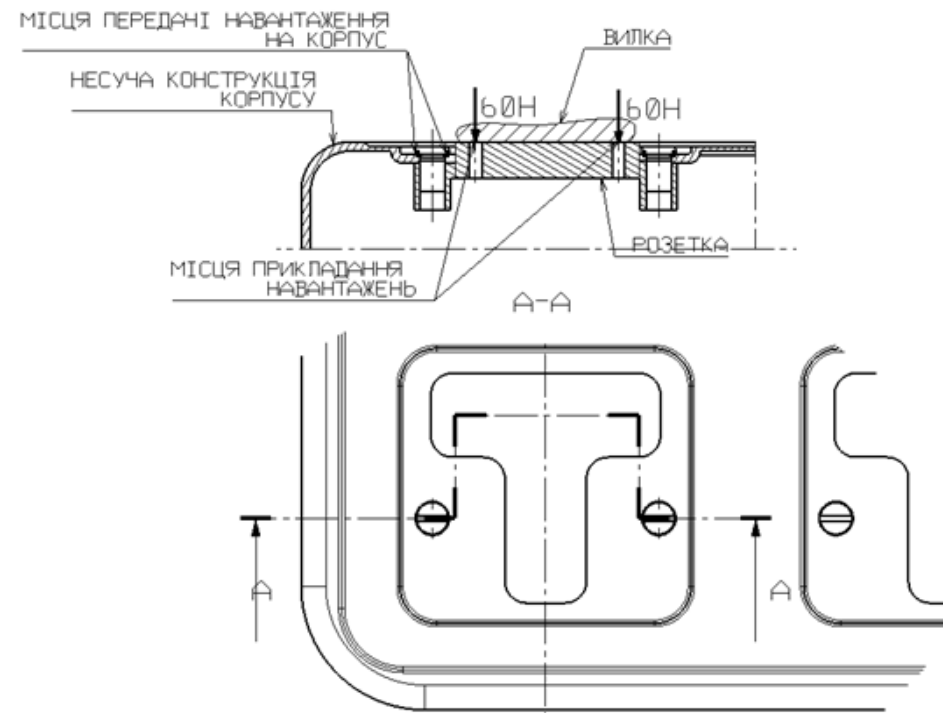
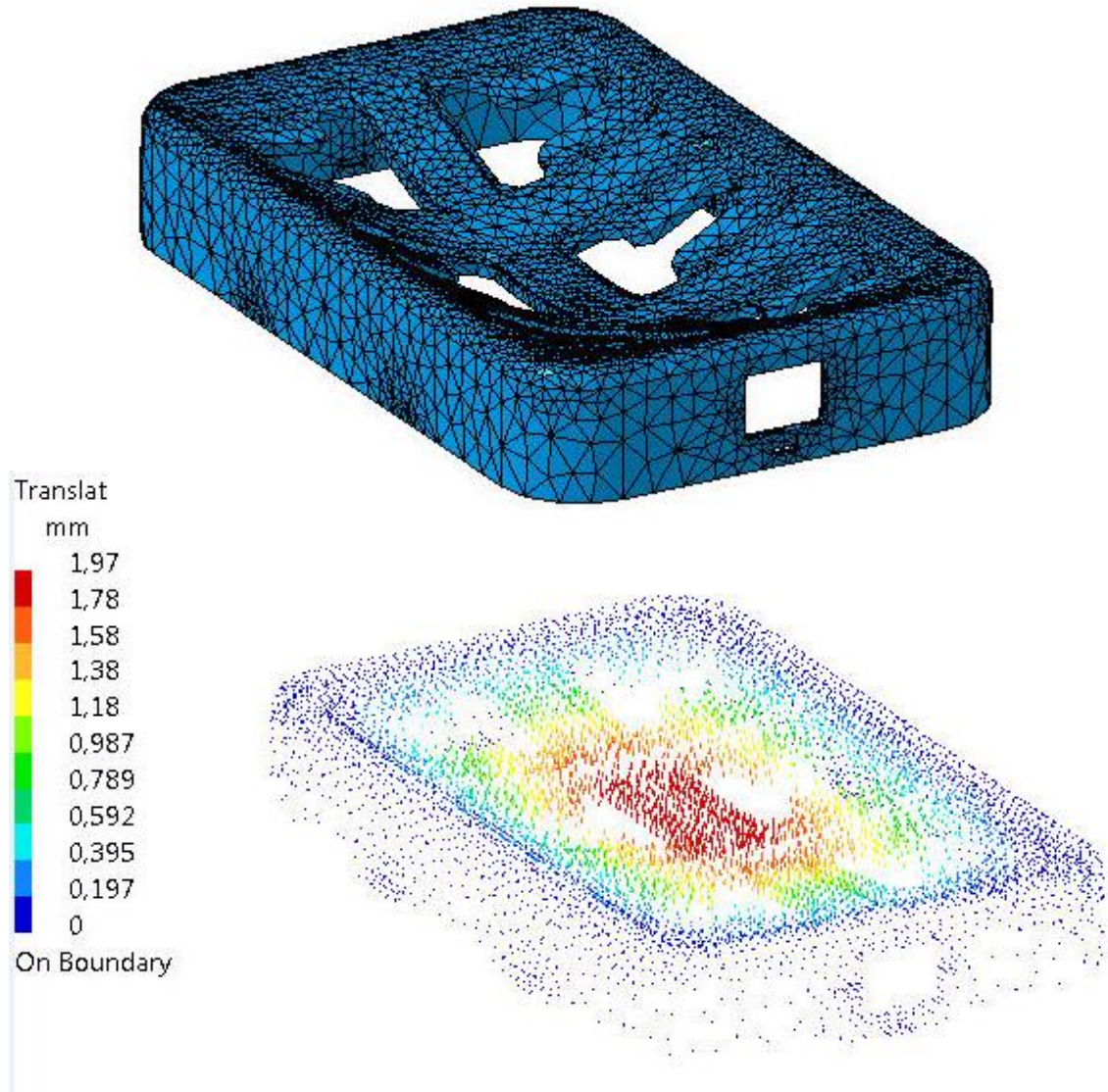


Схема передачі навантажень на корпус

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНО ДОПУСТИМОЇ ТОВЩИНИ СТІНКИ КОРПУСУ

Основні допущення при аналізі:

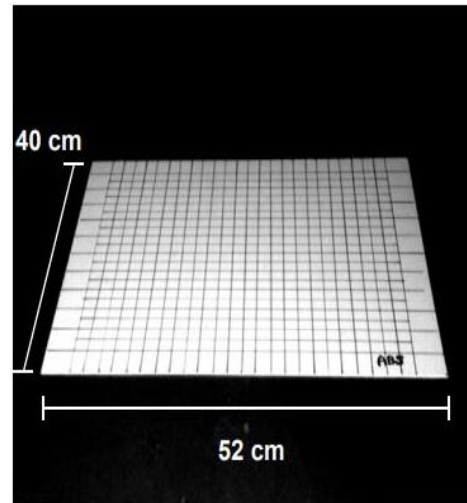
- Зведення задачі до лінійної;
- Прикладанням додаткових моментів сили можна знехтувати з огляду на досить малий їх вплив на процес деформації.
- Лист пластику до формування та після має рівний об'єм, тому потоншення відбувається рівномірно по всій поверхні



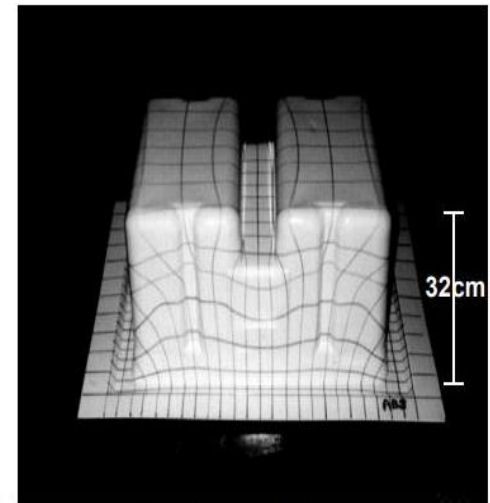
Статичний аналіз жорсткості та деформації корпусу

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТОВЩИНИ СТІНКИ В ПРОЦЕСІ ВИТЯЖКИ

- Фізико-хімічна особливість високоеластичного деформування полягає в тому, що воно відбувається за рахунок витягування макромолекул, кінці яких зберігають незмінне положення
- Для кожного термопластичного матеріалу визначений свій температурний діапазон, в якому він в достатній мірі може бути підданий витяжці



ЗАГОТОВКА



ФОРМОВАНИЙ МАТЕРІАЛ

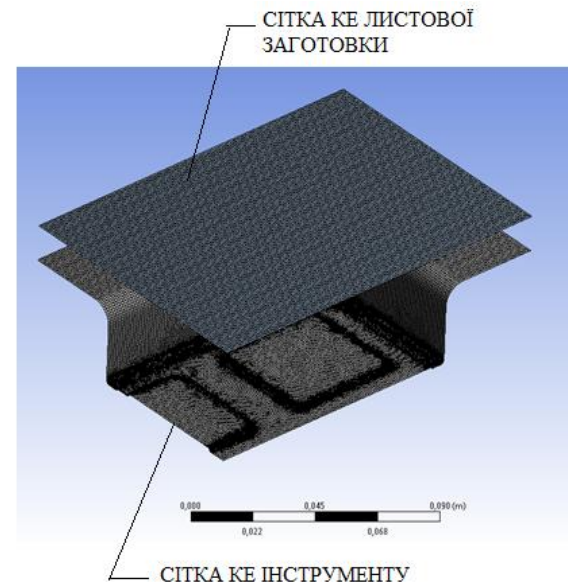
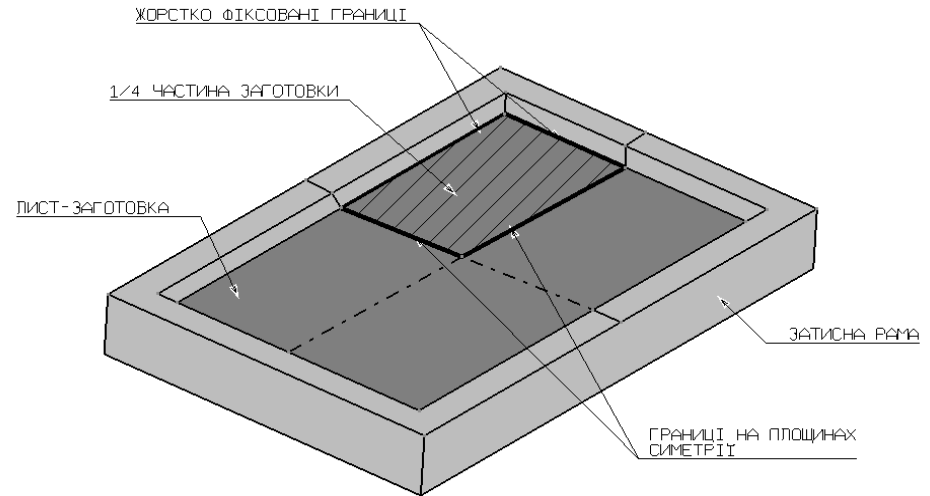
Вирішення задачі полягає у правильному виборі початкової товщини листа-заготовки так, щоб після процесу термоформування не виникало потоншень менших, ніж допустимі.

В реальному процесі формування відбувається нерівномірна зміна товщини та виникають потоншення, тому необхідним є врахування саме елементів форми корпусу при витяжці.

Для уникнення надмірних витрат при проведенні фізичних експериментів доцільно скористатися методами КЕ, що дозволяють дослідити процес витяжки полімерного матеріалу

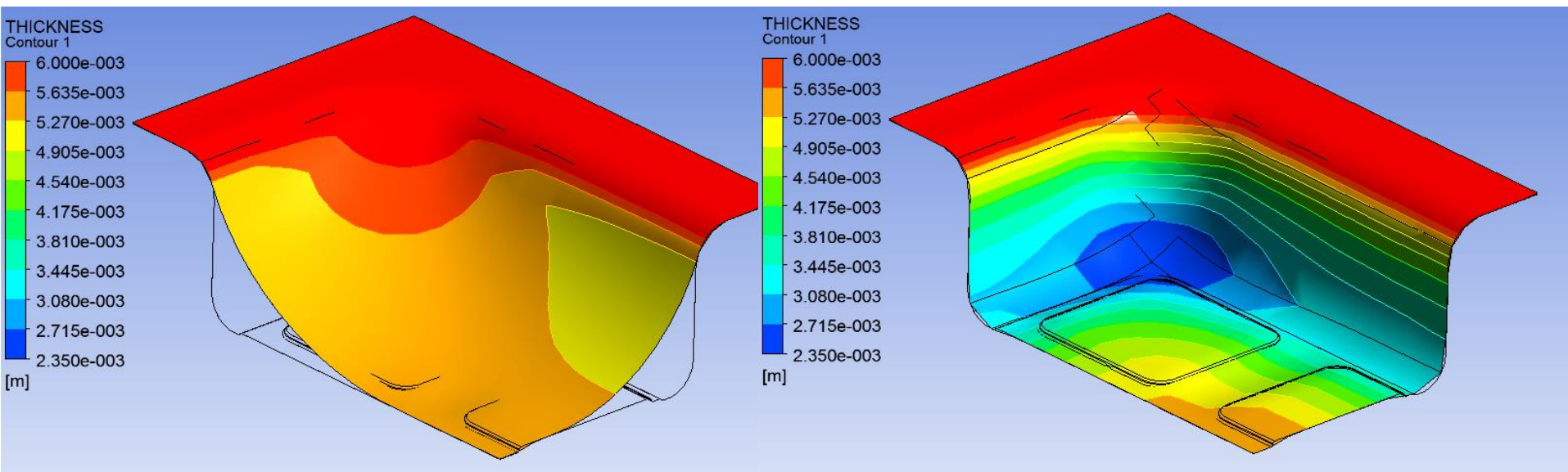
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТОВЩИНИ СТІНКИ В ПРОЦЕСІ ВИТЯЖКИ

- задача дослідження зводиться до виявлення контактів заготовки та форми. За рахунок програмного забезпечення ANSYS Polyflow будуть обчислені динамічні та кінематичні рівняння, що спричиняють зміщення вільної поверхні. Як тільки контакт відбувається, зсув вільної поверхні стає неможливим у напрямку, нормальному до поверхні інструменту. В основі даних обчислень полягають гіпотези механіки неньютонівської рідини, що являє собою суцільне рідке тіло, для якого дотичні напруження внутрішнього тертя, спричиненого відносним проковзуванням (зсувом) шарів рідини описуються нелінійною залежністю від градієнта швидкості у напрямі, перпендикулярному до напрямку проковзування



ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТОВЩИНИ СТІНКИ В ПРОЦЕСІ ВИТЯЖКИ

- Змодельювавши процес отримали характер розподілення товщини стінки та його мінімальне значення – 2,3 мм.

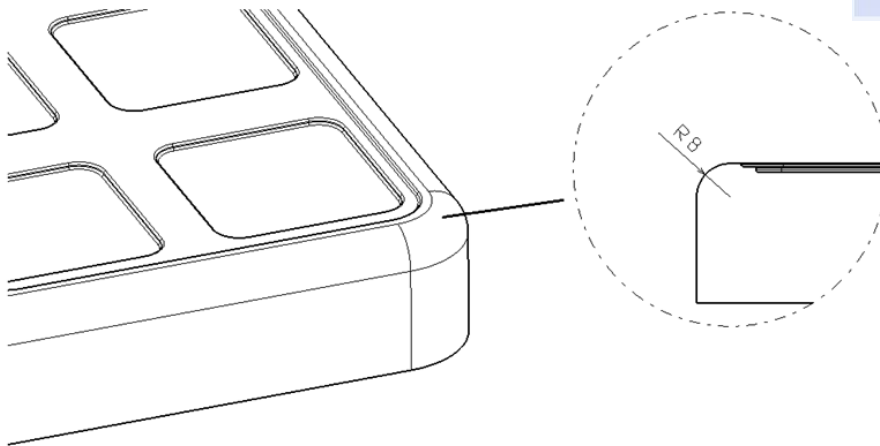


Товщина листа, розрахована за спрощеною методикою не задовольняє вимогам до конструкторської з боку жорсткості

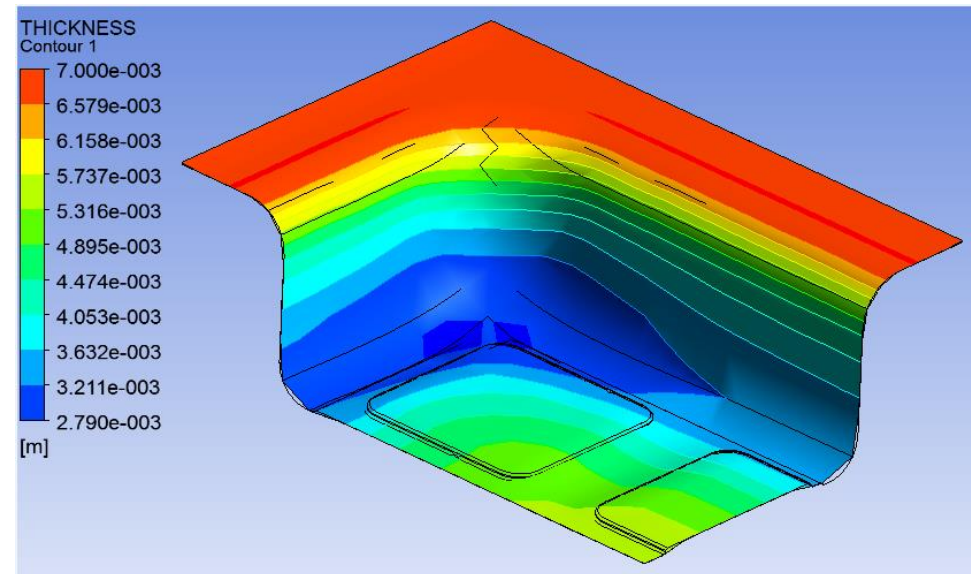
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТОВЩИНИ СТІНКИ В ПРОЦЕСІ ВИТЯЖКИ

Прийнято комплексне рішення для покращення результатів:

- Радіус округлення кромки збільшити до 8 мм (Рис. 2.16);
- Товщину листа-заготовки збільшити до 7 мм;
- Підвищити температуру розігріву листа до 200°C



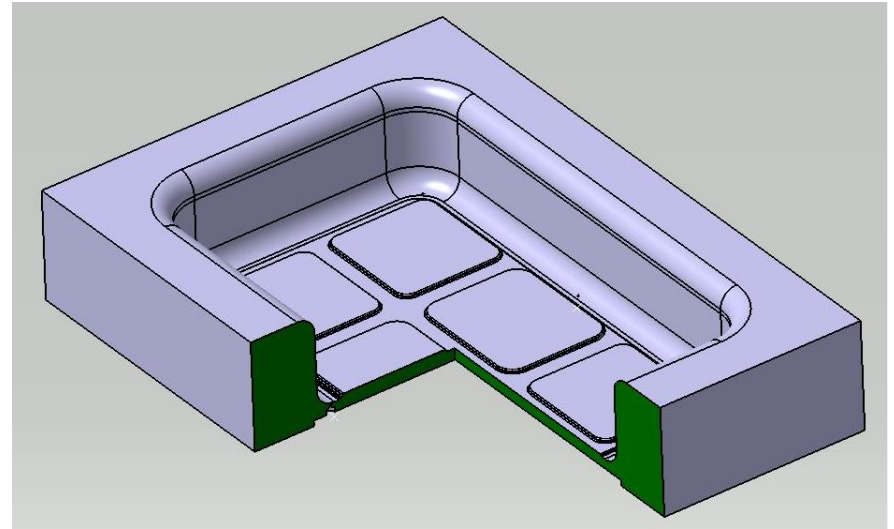
Зміна радіусу округлення кромки корпусу



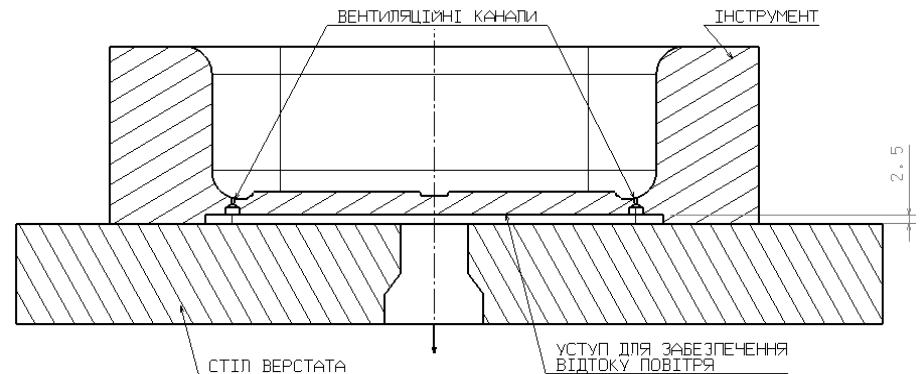
Результат моделювання після
внесених змін

ФОРМОУТВОРЮЮЧИЙ ІНСТРУМЕНТ

Детально дослідивши процес витяжки матеріалу при термоформуванні отримали оптимальну відкоректовану контактуючу поверхню інструменту, що дозволяє отримати деталь з відповідною мінімальною товщиною стінки. Таким чином контактуюча поверхня буде становити основну формуючу частину. При подальшому оформленні інструменту необхідно додати плоскі фланці навколо формуючої частини, оснастити конструкції інструменту отворами для відведення повітря.



Формуючий інструмент корпусу

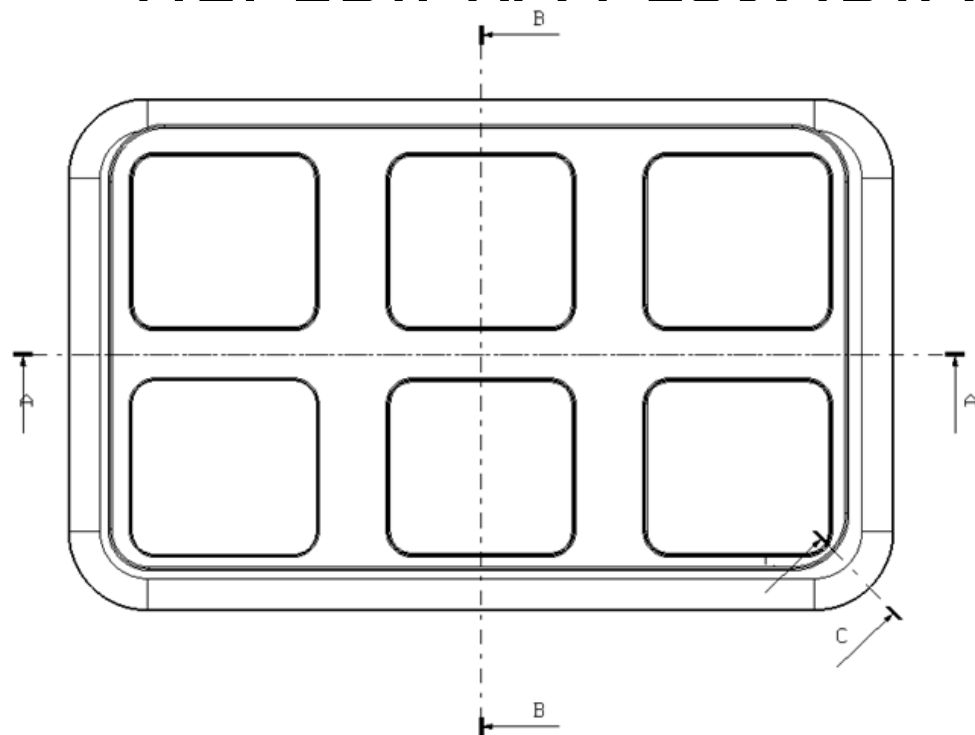


ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

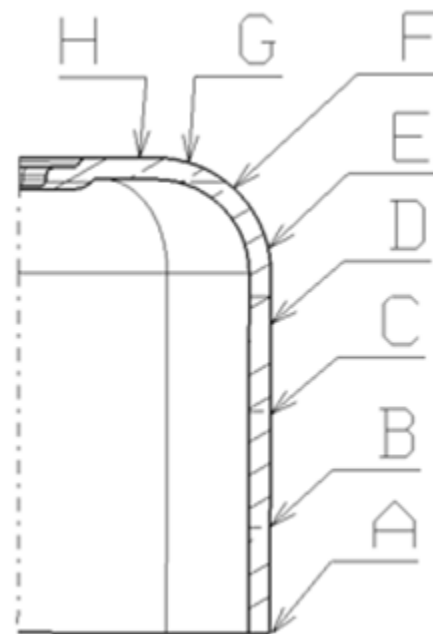
Результати моделювання необхідно перевірити на відповідність його фізичній моделі. Адже підтвердивши застосовану методику можливо уніфікувати та стандартизувати в межах підприємства процес проектування виробу та інструменту для подальших проектів. Що, в свою чергу, дозволило скоротити строки проектування та виготовлення інструменту і зменшило б рівень ризиків при виготовленні таких типів деталей.



ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ



Перерізи в яких проводились вимірювання

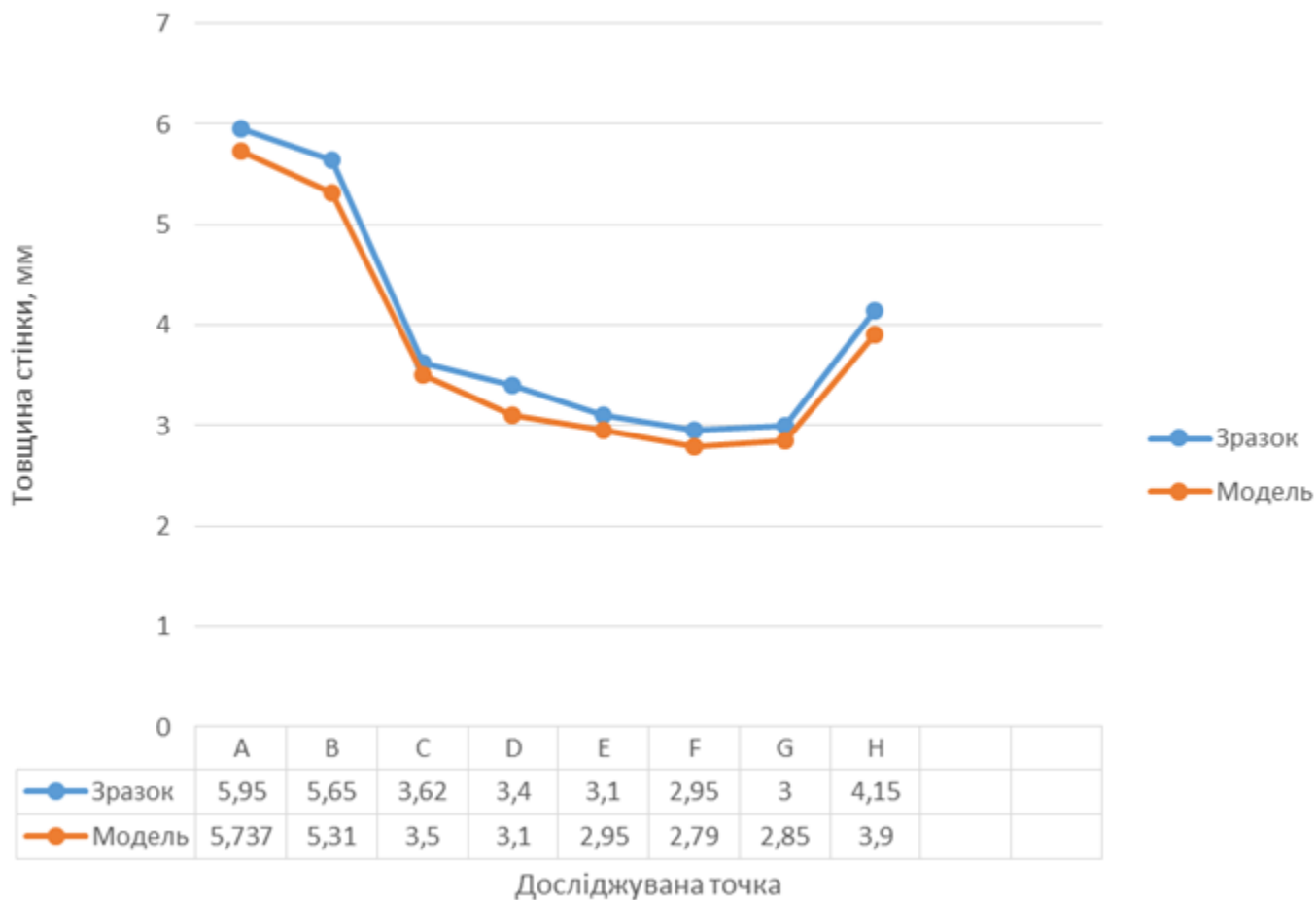


Досліджувані точки

Переріз	Висота точки, мм									
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
A-A	0	8	16	24	28	33	33	32.5	32.5	32.5
B-B	0	8	16	24	26	30	33	32.5	32.5	---
C-C	0	8	16	24	26	30	32	33	---	---

Характеристика досліджуваних точок

ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ



Переріз C-C

ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

За результатами проведеного порівняння можна підвести такий підсумок:

- Характер розподілення товщини має спільні риси при моделюванні процесу та дослідженні фізичної моделі корпусу. Спрощена методика не може використовуватися при оцінці зміни товщини деталі. Вона може лише слугувати відправною точкою для подальшого моделювання процесу.
- Отримані значення товщини реальної деталі є дещо більшими за розрахункові. Максимальна різниця показників вимірів менше 10%. Це можна пов'язати з наступними чинниками:
 - При моделюванні процесу не враховувався допуск товщини листа заготовки;
 - Неможливість забезпечити абсолютно однаковий розігріву форми та контролю температури;
 - При моделюванні не врахована усадка матеріалу;
 - Різниця в реальному значенні тиску формування та розрахунковому;
 - Неоднорідність матеріалу, наявність включень;
 - При моделюванні процес вважався ізотермічним, тобто не враховувалась передача тепла від заготовки до інструменту, що змінювало показники пластичності матеріалу.
- За результатами, в цілому, можна зробити висновок, що моделювання процесу витяжки є виправданим засобом оцінки розподілу товщини стінки на етапі проектування виробу. В будь-якому випадку такий метод є більш ефективним та економічно вигідним ніж проведення ітерацій на реальному обладнанні.

ВИСНОВКИ

- В ході виконання дисертаційної роботи було виконано такі задачі:
- Проаналізовано методи виготовлення деталей з полімерних матеріалів та їх ефект від застосування в галузі малосерійного виробництва електротехніки.
- Обрано та обгрунтовано технологію виготовлення деталі корпусу шляхом термоформування, досліджено особливості процесу вакуумного термоформування.
- Вирішено проблему контролю нерівномірного розподілу товщини стінки корпусу шляхом моделювання процесу витяжки матеріалу при термоформуванні.
- Проаналізовано особливості та вимоги до формоутворюючого інструменту при вакуумному термоформуванні.
- Розроблено технологічний процес виготовлення корпусної деталі з АБС пластику та виготовлено тестовий зразок несучої конструкції корпусу.
- Порівняно результати моделювання розподілу товщини стінки з фізичною моделлю шляхом вимірів дослідного зразка.
- Розроблено ряд рекомендацій щодо використання результатів моделювання при проектуванні виробу.

ВИСНОВКИ

- Конструкцію майбутнього корпусу було досліджено на механічну жорсткість, визначено допустимі прогини при лінійних навантаженнях корпусу та відповідну мінімально-допустиму товщину стінки корпусу. Аналіз виконувався сучасними методами статичного аналізу за допомогою методу кінцевих елементів.
- Детально дослідивши процес формоутворення шляхом вакуумного термоформування було виявлено ряд проблем, що впливають на якість поверхні, міцність та жорсткість.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!